



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

CONSTRUCCIÓN E INSPECCIÓN DE TÚNELES

Treball realitzat per:

Sandra Molinero Gómez

Dirigit per:

Sebastian Olivella

Grau en:

Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, 27/01/2016

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

ÍNDICE

1 RESUMEN	2
2 INTRODUCCIÓN.....	3
3 CONTRUCCIÓN DE TÚNELES	
3.1 HISTORIA DE LOS TÚNELES.....	4
3.2 PARÁMETROS INFLUYENTES EN CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES	8
3.3 ESTUDIOS PRELIMINARES.....	18
3.4 OPERACIONES BÁSICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL	22
3.5 MÉTODOS DE PERFORACIÓN	30
3.5.1 MÉTODOS DE PERFORACIÓN CON VOLADURA.....	34
3.5.2 MÉTODOS DE PERFORACIÓN MECÁNICOS	37
3.6 AUSCULTACIÓN INTERNA EN TÚNELES Y EXCAVACIONES	45
3.7 INNOVACIÓN	48
3 INSPECCIÓN DE TÚNELES	
4.1 COMBINACIÓN DE TÉCNICAS PRECISAS, TERMOGRAFÍA Y REFLECTANCIA EN DIFERENTES PLATAFORMAS	63
4.2 COMPARATIVA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS.....	81
4.3 CASO PRÁCTICO DE INSPECCIÓN	89
5 CONCLUSION	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEJOS	
ANEJO 1 INSPECCIÓN EN TÚNEL 1	92
ANEJO 2 INSPECCIÓN EN TÚNEL 2	98

1. RESUMEN

En el presente trabajo final de grado se abordan los temas principales de la construcción e inspección de túneles, haciendo un barrido histórico desde las primeras técnicas empleadas hasta la actualidad.

Siempre ha existido una incertidumbre extra en obras subterráneas respecto a otro tipo de obras civiles, por desconocimiento del terreno. Esta ha propiciado la aparición de nuevos métodos de estudios preliminares como de técnicas, material a emplear etc para disminuir este ratio de incerteza y aumentar la seguridad.

Se plantean una serie de innovaciones tanto en la construcción como en la inspección y se propone un nuevo método de inspección.

Para acabar, se expone la inspección realizada de dos túneles mediante métodos convencionales complementados con diferentes avances en el sector, ligados al exponente crecimiento de la tecnología.

El objetivo pues del trabajo, recae en determinar y aprovechar los avances de la tecnología para la construcción e inspección en obras subterráneas, en concreto los túneles, sin olvidar la historia y su evolución.

2. INTRODUCCIÓN

En obras civiles se plantea frecuentemente el problema de la construcción de túneles, ya que nuestro país tiene una variada geografía presentando en diversos casos sistemas montañosos, lo que ha originado este tipo de construcciones, para poder enlazar en forma más explícita ciudades o lugares de importancia y facilitar los transportes más diversos. Además dado al notable crecimiento en las últimas décadas de la actividad económica de nuestro país ha sido necesario estudiar nuevas alternativas de tránsito a las ya existentes, mejorando así los niveles de servicios de nuestros caminos.

Las técnicas de construcción de túneles se mejoran y perfeccionan continuamente, tanto en el aspecto de seguridad como en el de rendimiento, es así como surge la necesidad de investigar las nuevas técnicas de construcción e inspección para el aprovechamiento de los recursos disponibles a un costo de operación y mantenimiento más bajo.

El principal objetivo de esta memoria es realizar un estudio detallado de esta innovación tecnológica, sin olvidar los métodos clásicos, de forma que ésta sirva de guía para las diferentes personas que se ven involucradas en la construcción e inspección de un túnel, ya que las publicaciones existentes son escasas y no debidamente actualizadas (debido al constante avance del mundo tecnológico).

A continuación se exponen las diferentes alternativas que existen hoy en día para la realización de este tipo de obras como también para su inspección. En un principio, a modo de introducción, se dará a conocer el origen de estas construcciones a lo largo de la historia, tanto en España como en el resto del mundo, además se presentará el futuro de las inspecciones en túneles, es decir, posibles proyectos próximos esperando que se cumplan en un futuro no muy lejano.

Se compararán los diferentes métodos de construcción, como también de la tecnología usada en su inspección. Se presentará el dron como alternativa futura.

3 CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

3.1 HISTORIA DE LOS TÚNELES

El túnel arranca de la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente un macizo montañoso. Pero además de la montaña existen otras barreras que se pueden salvar mediante túneles como los cursos de agua, fluviales o marinos, y las zonas urbanas densamente edificadas en las que a menudo se incorporan túneles. Entre los usos más frecuentes pueden enumerarse los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril interurbano y urbano o Metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento, galerías de servicio y para almacenamiento de residuos (A.G.P.). El túnel en sentido estricto se caracteriza por su marcado carácter lineal, aquí me centraré en los túneles de carreteras, sin olvidar la historia de las redes de ferrocarriles que marcan un antes y un después en la evolución; en suma, el túnel como obra de tránsito.

Métodos de perforación de túneles

El primer método de perforación de galerías mineras y, con posterioridad, de túneles fue la técnica del fuego, consistente en provocar un incendio en el frente de ataque para luego sofocarlo bruscamente con agua fría produciendo un brusco gradiente térmico que da lugar al resquebrajamiento de la roca; pero esta técnica también provoca, como no es difícil imaginar, una atmósfera viciada, irrespirable, generando gases a menudo venenosos, convirtiendo el trabajo del minero en una trampa mortal a la que sólo unos pocos afortunados sobreviven.

Pero es en el siglo XVIII cuando surge la Era de los Canales y dentro de ella los túneles comienzan a adquirir peso propio: el túnel de Milpas, cerca de Beziers en el Canal de Midi para la unión de los dos mares (Atlántico y Mediterráneo), obra portentosa que impulsa Colbert bajo el reinado del Rey Sol (Luis XIV).

El canal del Mediodía (canal du Midi en francés, canal del Miègjorn en occitano) es una vía navegable de Francia que une el río Garona en Toulouse con el mar Mediterráneo. Forma junto al canal lateral del Garona (que une Toulouse y Burdeos) el llamado canal de los dos

Mares que comunica por vía fluvial el Atlántico al Mediterráneo, siendo prolongado en su origen por el canal del Ródano a Sète.

En el momento de su construcción se le llamó Canal Real del Languedoc, siendo rebautizado con el nombre actual en 1789 durante la Revolución francesa. Se trata del canal navegable en funcionamiento más antiguo de Europa.

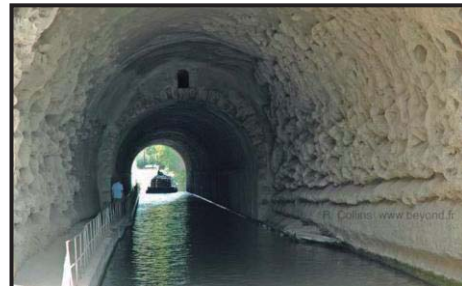


Ilustración 1 Localización del Canal Midi y fotografía del mismo

Este túnel, de 155 m de longitud, 6,5 m de altura y 8 de anchura, fue perforado por Pierre-Paul Riquet, empleando la pólvora por primera vez. Así comienza la Era de los túneles para canales: tras él muchos túneles se construirán en las siguientes décadas destacando los túneles ingleses para canal, muchos de ellos obra de ese prodigioso ingeniero James Brindley. La experiencia adquirida con la construcción de túneles para canal resultaría valiosísima en el período siguiente, ya superado en el corazón de Europa el umbral de la Revolución Industrial, la Era de los Ferrocarriles.

Durante este período también tiene lugar la gesta de la perforación del primer túnel bajo el Támesis entre Rotherhithe y Wapping, (después de la lucha durante 20 años y los cinco intentos fallidos), el primero que se construye en terreno blando y con enorme presencia de agua y en el que por primera vez se aplica la técnica del escudo que patentase Marc Brunel. Su idea fue ir hincando horizontalmente un gran prisma hueco de unos 65 m² mediante gatos mecánicos, construyendo por detrás del prisma, el sostenimiento definitivo del túnel, el cual a su vez serviría como reacción para el avance del propio escudo en el túnel que parecía imposible construir, bajo el río Támesis.

Para proteger de derrumbamientos la zona de construcción del sostenimiento definitivo, existía un solape, a modo protección mediante chapas gruesas entre el escudo y el recubrimiento. El escudo, además, contaba con una serie de planchas de hierro forjado de 6.9cm de grosor en los laterales y en su superior para evitar que las paredes se desprendieran

antes de ser recubiertas con ladrillo. Esta es la verdadera innovación del escudo, reducir al mínimo ese tiempo para minimizar así el riesgo de hundimientos durante el avance de la perforación.

La metodología de trabajo consistía, en función de la estabilidad del terreno a perforar, abrir más o menos celdas a la vez y excavar el frente unos centímetros, cuando una columna había sido excavada totalmente, se avanzaba esta. El frente de cada celda estaba cerrado con tabloncillos de madera, de forma que en casos de terrenos muy inestables, se podía estabilizar.

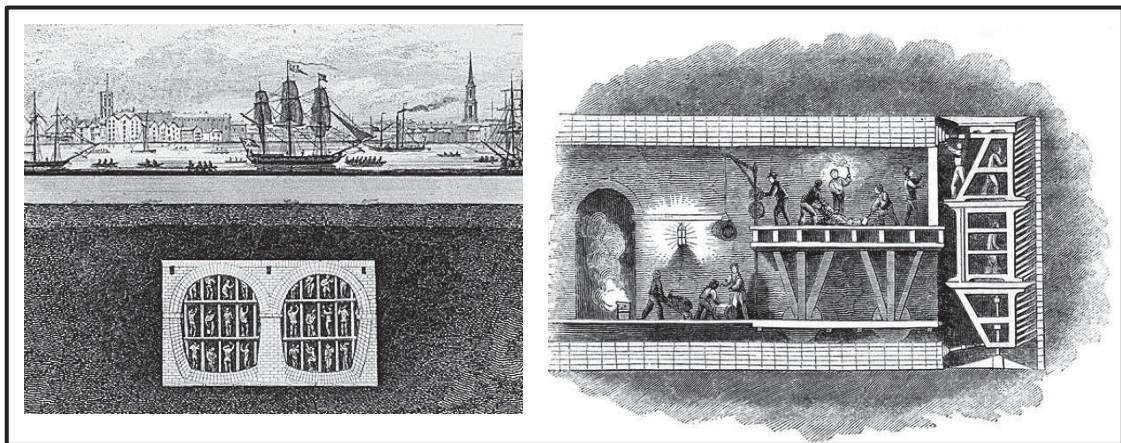


Ilustración 2. Túnel bajo el Támesis empleando la técnica del escudo

En España, el ferrocarril y la locomotora a vapor supusieron una gran innovación en materia de transporte y comunicaciones. Tras diversos proyectos que no llegaron a realizarse, los primeros trayectos que se abrieron al tráfico en la Península fueron el de Barcelona a Mataró, en 1848, y el de Madrid a Aranjuez, en 1851.

Desde el principio, fueron muchas las solicitudes que hicieron diversas compañías extranjeras para construir y explotar líneas ferroviarias; la mayoría de ellas eran proyectadas para servir a intereses mineros que también estaban en manos de capital extranjero. En 1855 se promulgó una ley que regulaba las concesiones y permitía la importación de material ferroviario, y que la industria siderúrgica española no podía producirlo. Pronto contó España con una excelente red ferroviaria que revolucionó el transporte y contribuyó a romper la incomunicación entre regiones y comarcas.

Con relación a Europa, los ferrocarriles españoles presentaban la diferencia del ancho de vía. Los demás países europeos utilizaban una separación entre raíles de 1.435 mm, que se consideró insuficiente en España por los desniveles del terreno y el trazado sinuoso, obligado

por el relieve; con el fin de proporcionar una mayor estabilidad a los trenes, se adoptó en 1844 la anchura de vía de seis pies castellanos, equivalentes a 1.672 mm que evolucionó hasta el ancho ibérico de 1668mm. La medida, en la que también debieron influir razones estratégicas, ha supuesto el aislamiento ferroviario de España con respecto al resto de Europa hasta fechas recientes; el problema se ha resuelto mediante la instalación de intercambiadores de ejes en las estaciones fronterizas con Francia.

Curiosidades

En aquellas décadas la temeridad y audacia de los ingenieros no tenía límites y tal vez por ello ninguno de los que emprendieron los tres grandes túneles alpinos de ferrocarril pudieron ver su obra terminada. Probablemente, en ocasiones, también a causa de una ambición desmedida, las condiciones de trabajo resultaban inhumanas, destacando la negra historia de Louis Favre y el túnel de San Gotardo. El compromiso de un plazo de ejecución imposible de cumplir con duras penalizaciones por cada día de retraso condujo a Favre primero a la ruina, luego a la muerte y a sus trabajadores a unas condiciones laborales y sanitarias infernales, estimándose en cerca de doscientos el número de muertos durante las obras; un precio muy elevado. La obra duró desde 1871 hasta 1881 .El túnel ferroviario de San Gotardo es un túnel de 15 km de longitud ubicado en Suiza que atraviesa el Macizo de San Gotardo en los Alpes Lepontinos de norte a sur desde Göschenen hasta Airolo. En su momento, fue el túnel más largo del mundo, con 15 kilómetros de longitud.

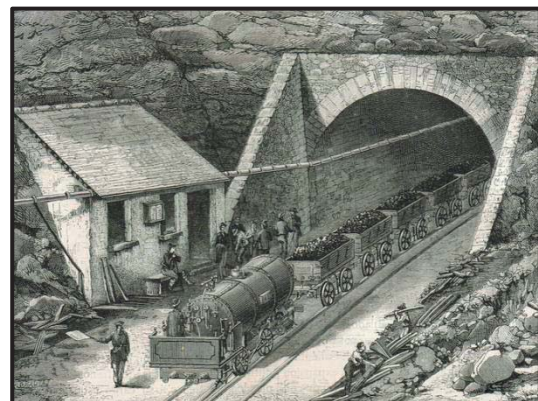


Ilustración 3 Túnel de San Gotardo

También en Estados Unidos se van imponiendo los túneles en la segunda parte del siglo XIX. Cabe recordar dos túneles bajo el río de Chicago abiertos en 1869 y 1871, que sirvieron como la única vía de escape para los habitantes de la ciudad durante el feroz incendio que redujo la ciudad a cenizas en octubre de 1871, sólo cuatro meses después de inaugurarse el túnel de la calle La Salle. El túnel Hoosac marca también sin duda un hito a nivel de avances tecnológicos, como el de la utilización por primera vez de la nitroglicerina, el explosivo más fuerte de la historia, y el túnel de Saint Clair construido a finales del XIX bajo el río que le da nombre entre EE.UU y Canadá mediante un escudo de 6.45 m de diámetro.

Como hemos visto el resurgimiento de los túneles como consecuencia de la Revolución Industrial, la máquina de vapor y los ferrocarriles marcó un hito importante en el diseño y construcción de los mismos. Los siguientes avances fueron debidos a diversas causas. Así, la electricidad y la potencia eléctrica propició la aparición de los ferrocarriles subterráneos, el metro.

3.2 PARÁMETROS INFLUYENTES EN CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

Son innumerables los túneles construidos desde entonces hasta la actualidad, así como las mejoras en las técnicas y elementos constructivos. Lo métodos en que he profundizado en esta tesina son el inglés, el belga, el alemán y el austríaco como también el Nuevo Método Austríaco y la utilización de tuneladoras como método mecánico. Considero que es importante conocer los principales factores que han contribuido decisivamente en este avance; por ello he desarrollado el siguiente listado:

- En relación con la excavación, las mejoras en las técnicas de voladura, tanto en la fase de barrenado como en los tipos de explosivos, la introducción de nuevos equipamientos y maquinaria como la creación de TBM o rozaduras, el uso más eficiente de la energía son determinantes en la actualidad.
- En relación con el sostenimiento, los avances en materia de revestimientos, principalmente en hormigón y acero moldeado, en mejora del terreno mediante inyecciones a presión como el perfeccionamiento de máquinas tuneladoras a sección completa.
- En relación con las características del entorno de trabajo, cabe resaltar las notables mejoras en sistema de ventilación e iluminación como también un control más eficaz

del agua subterránea mediante equipos de bombeo a través de sobrepresión ambiental.

- En relación al reconocimiento del terreno, cal aun trabajar en ello ya que por lo general, saber ante que terreno nos exponemos es difícil de adivinar por las dificultades de llegar a él, sobretodo en túneles interurbanos profundos, como por el carácter puntual de las prospecciones. Algún ejemplo de estas prospecciones son la presencia de fallas y accidentes, la existencia de agua o gas a presión, la posibilidad de inducir al terreno importantes deformaciones...

Parámetros determinantes

- El terreno, que puede ser desde un terreno muy blando, incluso expansivo hasta una roca muy competente; la selección que se haga del terreno implicará cambios en la geometría, en la forma de la estructura y por supuesto en el método de construcción.
- Las dimensiones del túnel acabado (ancho, altura y longitud), así como los parámetros que definan la planta (curvas circulares, de transición) y el alzado (pendientes máximas); estos límites podrán ser muy reducidos en unos casos, y se podrá disponer de un amplio campo de posibilidades en otros.
- La forma geométrica, que podrá ser un círculo, rectangular, de herradura, etc. y el material de sostenimiento utilizado será principalmente el hormigón con mayor o menor espesor y el acero. La forma estructural deberá soportar las presiones de los terrenos. Tanto el tipo de terreno como el método de construcción influirán decisivamente.

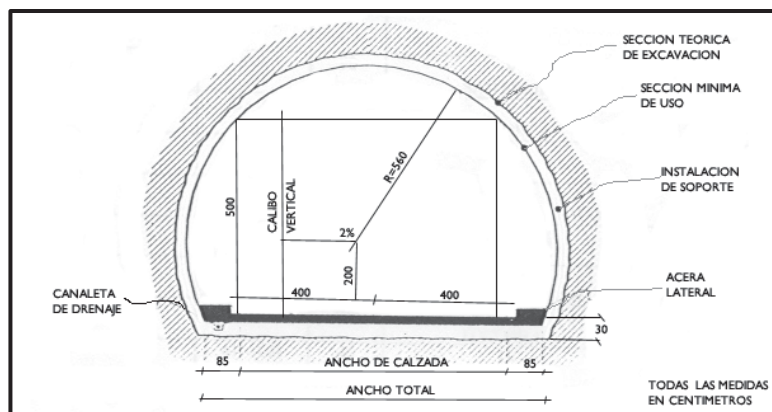


Ilustración 4 Esquema de la sección transversal de un túnel

-El sistema de construcción que presenta numerosas posibilidades, desde, la excavación por explosivos hasta las máquinas tuneladoras a sección completa, pasando por los procedimientos de corte del terreno y posterior relleno para los túneles más superficiales o falsos túneles. La elección del método vendrá determinada por las condiciones del terreno pero también por los medios económicos de que se disponga.

- El equipamiento del túnel ya terminado, las calzadas o las vías de ferrocarril, la iluminación, los sistemas de control, los acabados decorativos en su caso.

- La ubicación del túnel, los obstáculos naturales que hay que salvar son variados (cadenas montañosas, ríos, estuarios o mares, y en una ciudad las calles, edificios u otras estructuras). Por ello los clasificaremos en túneles de montaña, túneles subacuáticos y túneles urbanos. Me centraré en los túneles de montaña; si el obstáculo es una cadena montañosa, la construcción de un túnel puede suponer un ahorro considerable de tiempo y energía frente a otras alternativas de trazado.

Existen dos soluciones para atravesar con un túnel una cadena montañosa: la de un túnel corto a una cota elevada, solución más económica pero que exige largas pendientes y curvas cerradas hasta llegar a la altura elegida, o la de un largo túnel a un nivel más bajo, con el que se acortarán distancias y se ahorrará en combustible y tiempo, aunque la inversión de capital será mucho mayor. También su utilización será mucho mayor ya que no se verá afectado por las nieves invernales de los túneles anteriores.



Ilustración 5 Túnel a media montaña con salida a viaducto, túnel a pie de montaña

Resulta también de especial importancia la ubicación geográfica (fundamentalmente la altitud) en donde se ubique la obra y el clima del sector.

-Clima i altitud, toda obra localizada en altura considerable y en un clima lluvioso o sectores con filtraciones mayores, requerirá el diseño especial de canaletas conductoras – evacuadoras de aguas, las cuales deberán ser calculadas, dimensionadas y localizadas de manera que cumplan con el objetivo de mantener las pistas secas.

La ubicación geográfica determinará la posibilidad de congelamiento de aguas de escorrentía o infiltraciones a la obra para lo cual deberá procederse a neutralizar el fenómeno que provoque esta situación.

Hay dos fenómenos, particularmente peligrosos para los conductores, que se producen frecuentemente en túneles cordilleranos con exceso de agua, que deben evitarse a toda costa:

- Pavimentos con una película superficial de agua congelada, que se tornan muy resbalosos.
- Empañamiento repentino del parabrisas al ingresar un vehículo a baja temperatura a un túnel lleno de aire saturado y a mayor temperatura que el vehículo.

Para evitar estos fenómenos se deberá considerar en el proyecto la colocación de láminas térmicas, por ejemplo impermeabilizantes los cuales evitan la generación de goteos y su posterior congelación de arriba hacia abajo (estalactitas).

Todos estos factores se tienen en cuenta en la planificación y diseño del proyecto de un túnel.

Túneles de carretera

Los túneles para carreteras pueden ser, cortos y largos; su definición en planta también tiende a ser en recta por ser el camino más corto y por lo tanto el más económico, aunque al igual que para el ferrocarril se construyen en curva si las condiciones del terreno a atravesar lo recomiendan o por otras causas. Las curvas pueden ser más cerradas que otro tipo de túnel por ejemplo el ferroviario (son normales radios de 400 m).

El perfil longitudinal dependerá de las condiciones necesarias para la evacuación de las aguas por gravedad, tanto durante su construcción como posteriormente.

Según normativa, los túneles de longitud igual o menor que quinientos metros (500 m) tendrán una sola inclinación de la rasante, salvo justificación en contrario.

En carreteras de calzadas separadas, se evitarán rampas mayores del tres por ciento (3 %), y pendientes mayores del cinco por ciento (5 %), En carreteras de calzada única, se evitarán inclinaciones de rasante mayores del tres por ciento (3%).

Cuando la longitud del túnel sea mayor que quinientos metros (500 m), la inclinación de la rasante será objeto de un estudio específico. En general, la combinación de inclinación y longitud de las rampas en túneles, deberá ser tal que no obligue al diseño de carriles adicionales. En cualquier caso, salvo justificación en contrario, el trazado en alzado del túnel será tal que en toda su longitud la velocidad de los vehículos pesados no sea inferior a sesenta kilómetros por hora (60 km/h).



Ilustración 6 Túnel de carretera travesando la montaña

Lo normal es que se construyan túneles de dos carriles ya que, el aumento del ancho repercute de manera desproporcionada el costo por aumentar el sostenimiento como también el volumen a excavar.

Por ello es preferible la construcción de dos túneles en paralelo cuando la necesidad sea de cuatro carriles, dos por cada sentido.

En cuanto al equipamiento del túnel, es necesaria una iluminación que debe ser potente en la entrada, sobre todo de día, y disminuir progresivamente hacia el interior cuando ya el ojo humano se ha adaptado al cambio de luminosidad exterior-interior. La iluminación debe prever hasta las situaciones de emergencia, como colapsos de tránsito o incendios. El proyecto de ventilación tiene gran influencia en el proyecto y construcción, pues el paso de los conductos de aire ocasiona problemas de espacio, y los futuros pozos de ventilación del túnel se pueden utilizar durante la construcción para multiplicar los frentes de excavación del túnel y también como ventilación

Se pueden hacer varias clasificaciones de túneles:

- *Según Ubicación*

Los túneles, según su ubicación en relación a las ciudades, pueden ser definidos como:

Rurales Son túneles ubicados fuera del entorno urbano y que, en general, están destinados a atravesar obstáculos físicos tales como montañas o cuerpos de agua que resultan difíciles o inconvenientes de cruzar mediante puentes.

Los túneles rurales habitualmente tienen pocas restricciones espaciales. Por otra parte, en ellos suele ser más costoso el abastecimiento de agua y electricidad para la operación de los sistemas de incendio, iluminación, ventilación, controles y comunicaciones que puedan requerirse. En general, estos túneles son excavados en roca y suelos residuales (cruce de montañas) o suelos sedimentarios (cruce de ríos y otros).

Urbanos Son túneles emplazados dentro de los límites de la ciudad y están fuertemente constreñidos espacialmente por las redes de servicios propios de las urbes modernas, como ser: redes de alcantarillado, redes de trenes subterráneos, redes de agua potable, redes de gas, redes de alimentación, eléctrica, teléfonos, fibra óptica, etc. Su perforación conlleva la generación de asientos diferenciales del terreno que pueden dañar las edificaciones situadas en área de influencia de la excavación. La predicción de dichos daños suele realizarse mediante la aplicación del método de la viga equivalente de Burland y Wroth en 2D, es decir, asumiendo edificios perpendiculares al eje del túnel y perfiles Gaussianos de asiento del terreno generados en su base. No obstante, para otras alineaciones deben utilizarse aproximaciones debido a la inexistencia de expresiones analíticas que permitan abordar estos casos. Los autores han obtenido una nueva ecuación para el cálculo de la deformación

horizontal del terreno. Dicha ecuación permite la aplicación del método de la viga equivalente en 3D para edificios ubicados en cualquier posición con respecto al eje del túnel. Además, el método permite tener en cuenta la posición del frente de excavación y, en consecuencia, el efecto del perfil longitudinal de asientos, aumentando así el realismo del campo de desplazamientos del terreno. El método se aplica a un caso real de edificios afectados por la excavación del túnel de la L9 de Metro en Barcelona mediante EPB (Earth Pressure Balance). Esta aplicación permite observar diferencias sustanciales en la predicción de daños según la alineación del edificio. Los resultados se comparan posteriormente con los obtenidos mediante el método tradicional y con el levantamiento de daños.

Los túneles urbanos son frecuentemente del tipo trinchera cubierta y excavados en suelos sedimentarios.

En los túneles urbanos los problemas de ventilación resultan, a veces, dificultados por el hecho de que no siempre se puede expulsar libremente el aire viciado proveniente del interior del túnel, debido a restricciones de carácter ambiental.

- *Según terreno a atravesar.*

Los túneles según sus características estructurales y de construcción pueden ser definidos como:

Túneles en roca (Normalmente a través de una montaña)

Túneles en suelo (Normalmente urbanos)

Túneles falsos (Construidos en hormigón armado y luego tapados con suelo. Generalmente se construyen antes de la entrada a los túneles en roca, para proteger a los vehículos de la caída de rocas).

Trincheras cubiertas (Estructuras de hormigón armado de sección rectangular, construidas en suelo y luego tapadas. Generalmente son urbanas).

Cobertizos (Estructuras de hormigón armado de sección rectangular construidos en zonas montañosas para proteger a los vehículos de las avalanchas de nieve. Estas estructuras generalmente son abiertas en uno de sus lados).

- *Según Clima y Altitud*

Resulta de especial importancia la ubicación geográfica (fundamentalmente altitud) en donde se ubique la obra y el clima del sector.

Toda obra localizada en altura considerable y en un clima lluvioso o sectores con filtraciones mayores, requerirá el diseño especial de canaletas conductoras – evacuadoras de aguas, las cuales deberán ser calculadas, dimensionadas y localizadas de manera que cumplan con el objetivo de mantener las pistas secas.

La ubicación geográfica determinará la posibilidad de congelamiento de aguas escurrientes o infiltradas a la obra para lo cual deberá procederse a neutralizar el fenómeno que provoque esta situación.

- *Según Equipamiento Según Flujo Vehicular y Longitud.*

En la siguiente imagen se ilustra una clasificación de los Túneles en función del Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) y del Tránsito en Hora Punta asociado a dicho TMDA, versus la longitud del conducto; según ello se clasifican las obras en cuatro categorías, para las que en la Tabla B se indica el tipo de Equipamiento de Seguridad y Control con que debería contar el Túnel. El TMDA se debe considerar al horizonte de diseño de la obra y el Tránsito en Hora Punta como el de la Hora 30 a dicho horizonte.

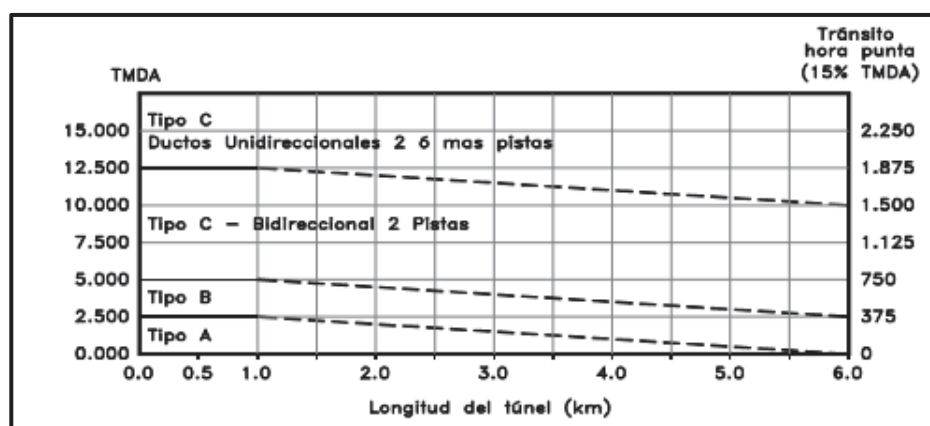


Ilustración 7 Clasificación de túneles en función del TMDA y el tránsito hora punta

Las líneas punteadas de la figura corresponden a la frontera para la cual a un mismo TMDA, túneles de mayor longitud pasan a la categoría superior en cuanto a equipamiento deseable.

Se establece además que según sea la longitud del Túnel, cuando el tránsito de la hora punta es del orden de 1500 a 1900 Veh/h, se deben diseñar túneles unidireccionales de 2 pistas cada uno; pudiendo inicialmente construirse un túnel bidireccional, para luego construir el segundo ducto quedando ambos unidireccionales.

Debe tenerse presente que para los TMDA indicados entre un 20 y 40% son camiones y buses, según el camino de que se trate. En hora punta estos porcentajes suelen bajar a valores comprendidos en el rango de 7 a 18%.

El volumen de 12.500 Veh/día, para un túnel corto, que requeriría Ductos Unidireccionales corresponde al porcentaje menor de camiones y buses. Consecuentemente, para el límite superior de vehículos comerciales la línea divisoria entre túnel bidireccional y de ductos unidireccionales se desplazará hacia abajo, dependiendo entre otros factores de la pendiente longitudinal y del tipo de carretera de que se trate, es decir de la calidad del servicio que le corresponda.

La longitud de un túnel es fundamental en la determinación de las especificaciones de requerimientos de equipamiento, ya sea para implementación inmediata o a futura.

Debe tenerse presente que siempre es posible realizar el equipamiento de un túnel, en forma progresiva. Sin embargo, es necesario tomar las precauciones respectivas en el diseño de la sección básica y obras civiles, particularmente si se pretende habilitar sistemas de ventilación en etapas posteriores.

En todo caso, la clasificación apunta principalmente al tipo de equipamiento con que deberían contar los túneles y la decisión de construir uno o dos túneles deberá ser tomada tras un estudio técnico económico que pondere adecuadamente todos los factores involucrados.

Un túnel de gran longitud pero de escaso tráfico puede considerar la postergación de cierta implementación, pero debe considerar en su diseño los espacios y/o condiciones específicas para estas implementaciones a futuro.

Según el tipo de túnel que corresponda de acuerdo a lo indicado, quedarán determinados los equipos de seguridad requeridos y/o recomendados en cada caso.

Equipamiento de Seguridad y Control en Túneles Mayores de 200 m.				
Equipamiento	A	B	C	Observaciones
Luces de evacuación de emergencia	○	○	●	Luces cada 50 m.
Extintores de incendio	○	●	●	Cada 100 m Tipo C Cada 200 m Tipo B
Teléfono de emergencia	○	○	●	Cada 200 m.
Señales de servicios	●	●	●	En cada servicio.
Marcas en pavimentos				
Ojos de gato	●	●	●	Continuas.
Red de control de incendio	○	○	●	Diseñar ad hoc.
Vigilancia de TV.	○	○	●	Diseñar ad hoc.
Iluminación interior	○	●	●	Diseñar ad hoc.
Equipos eléctricos de emergencia	○	●	●	Diseñar ad hoc.
Control de altura	●	●	●	200 m antes de portales. Con pista auxiliar para detención fuera de la carretera.
● Obligatorio ○ Recomendable				

Ilustración 8 Equipamiento de Seguridad y control en túneles mayores a 200m

Las principales características de estos Sistemas de seguridad son las que se indican:

Luces de Evacuación de Emergencia

Son luces usadas para indicar o mostrar el camino hacia las bocas de los túneles en caso de presencia de humo. Son equipos activados manual o automáticamente en caso de incendio. Debe tratarse de luz blanca que pueda verse a través del humo, instaladas en las paredes a 1 m sobre el pavimento y a lo menos cada 50 m una de otras, deben tener capacidad para permanecer a lo menos 1 hora encendidas.

Extintores de Incendio

Debe tratarse de equipos puestos en nichos en las paredes del túnel dentro de cubículos iluminados con puerta de vidrio delgado fácil de romper en caso de requerimiento. Deben estar indicados con señalización adecuada, reflectante e iluminación interior. A lo menos se considera un punto de ubicación cada 200 m.

Teléfonos de Emergencia

Estos teléfonos deben estar destacados, y deben funcionar de manera tal que emitan una señal al controlador con solo levantar el auricular no requiriendo discar ningún número. Se deben instalar en nichos cubiertos con un semi techo. Su número debe ser uno cada 200 m de longitud de túnel.

Señales de Servicio

Debe considerarse dentro del túnel la instalación destacada de señales camineras que indiquen la presencia de extintores de incendio, teléfono de emergencia, velocidad y otras condiciones especiales de la obra.

Marcas de Pavimento

Debe considerarse la instalación de este tipo de marcas reflectantes en el pavimento igual que su instalación en el camino exterior.

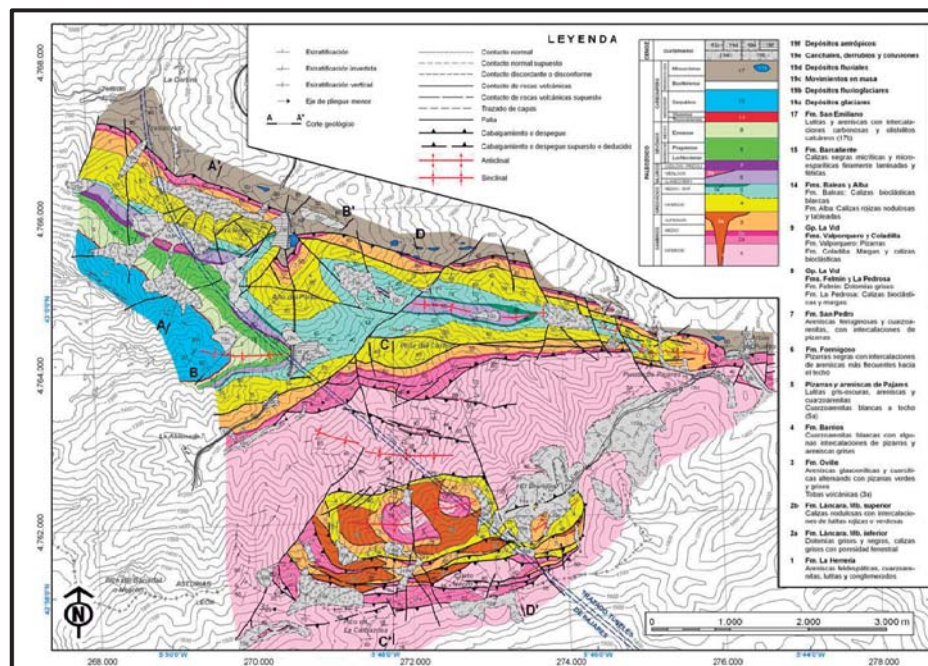
3. 3 ESTUDIOS PRELIMINARES

Todas las construcciones subterráneas necesitan de una detallada y extensa investigación antes de su proyecto, para que se pueda hacer la mejor elección de su trazado y diseño. Esta necesidad es, sin duda, mayor que para otro tipo de construcciones e implicará el estudio geológico del terreno, de sondeos e incluso de túneles de reconocimiento. No obstante, no hay que olvidar que la investigación continuará realizándose también durante la construcción.

Estudio geológico

La información geológica se obtendrá de los mapas e informes publicados y será de todo el trazado, incluso de sus posibles variantes. De esta manera se obtendrá una información aproximada de depósitos aluviales y tipos de roca que podremos encontrar en la excavación, así como de fallas y otros accidentes geológicos que habrá que investigar a fondo. Además en estos informes se indicará la posible existencia de napas de agua y cauces subterráneos. También nos aportarán datos los registros de perforaciones anteriores, como cimentaciones profundas, pozos, túneles anteriores, canteras y minas, e incluso la inspección de acantilados, lechos de ríos y cualquier otro tipo de excavación.

Todos estos datos son de carácter general y pueden ser insuficientes en determinadas zonas, por lo que se deben complementar con sondeos y galerías de reconocimiento.



Il·lustració 10. Ejemplo de estudio geográfico, túnel de Pajares

Sondeos

Los sondeos darán información sobre la naturaleza de las distintas capas, su consistencia y su grado de humedad.

La perforación con barrenos es el método más utilizado por razones de flexibilidad, rapidez y economía. El diámetro de los agujeros varía de 100 a 400 mm. y la profundidad puede superar ampliamente los 100 m. Se hace el agujero por métodos de percusión, alzando y dejando caer la herramienta adecuada según el tipo de terreno, o haciendo girar por medio de una varilla una broca de perforar o un barrenador. Se entiba con tubos de acero que se hacen bajar por el agujero. Aunque la barrena haya fragmentado la roca, ésta se puede identificar. Las muestras inalteradas requieren el uso de una broca anular con la que se extrae un núcleo.

Sea cual sea el método los fragmentos excavados se extraen y se examinan en la superficie. Una vez obtenidos deben sellarse inmediatamente para impedir cualquier cambio en el grado de humedad antes de su llegada al laboratorio, donde se obtendrán la mayor parte de las características necesarias para nuestros fines.

Más costosos, pero también más instructivos, son los sondeos por pozos, ya que la observación y toma de datos es directa en las paredes del pozo y por lo tanto no existe contaminación de unos terrenos con otros. En túneles de montaña son de difícil realización debido a la gran profundidad a que habría que excavar; no obstante, conviene hacerlos al menos en la zona de las bocas y alguno intermedio.

En terrenos permeables los pozos de sondeo no deben situarse encima del eje, aunque eso sea lo ideal para obtener información exacta, ya que se pueden crear zonas de drenaje en las que el agua satura el terreno, lo que dificultaría enormemente la excavación del túnel en su momento.

Los pozos de sondeo tienen la ventaja de que se pueden diseñar para su posterior utilización, bien durante la construcción del propio túnel con la finalidad de multiplicar los frentes de excavación o como tiros de ventilación provisionales o definitivos.



Ilustración 8 Sondeo por barrenos vs pozos

Los sondeos o jet-growing, también se utilizan en casos especiales para inyectar cemento y reforzar el terreno, para así ganar en terrenos poco compactos, capacidad portante y reducir su permeabilidad.

Exploración láser

El sistema de exploración láser para levantamientos subterráneos proporciona datos de las cavidades subterráneas inaccesibles para crear modelos 3D georreferenciados. Este

dispositivo permitiría realizar las operaciones sin comprometer la seguridad de los trabajadores.

Es apto para proyectos de construcción y geotécnicos en los que se necesite identificar, medir y levantar las cavidades situadas debajo de la zona de explotación. También sirve para evaluar la estabilidad de los trabajos y planes de proyecto para aumentar la productividad y la seguridad.

En cuanto a su funcionamiento, después de localizar la posición aproximada y la extensión del vacío/cavidad con un GPR o datos de archivo previos, se taladra una perforación de sondeo y se introduce el sistema C-ALS por el agujero taladrado u otro punto de acceso reducido. Una vez dentro del vacío, el cabezal del láser se abre para levantar la forma tridimensional de la cavidad. Los datos escaneados se pueden analizar visualmente, y con ellos tomar las medidas y calcular el volumen.

Este sistema permite planificar los costos de trabajo con precisión, crear programas de trabajo más eficientes, planificar nuevos proyectos, diseñar nuevas soluciones de ingeniería con datos precisos y reducir al mínimo la interrupción, las perforaciones y las molestias en áreas pobladas.



Ilustración 9 Láser C-ALS de Renishaw

Túneles de reconocimiento

Los túneles de reconocimiento son sin duda el método de exploración que da más información para la construcción del túnel. Se pueden excavar partiendo de las bocas del túnel o del fondo de los pozos de sondeo; pueden llevar la dirección del eje como túnel piloto que posteriormente será ampliado, o pueden ir en una dirección paralela y a la distancia

conveniente para su posterior utilización como galería de servicios o como túnel de drenaje o de ventilación.

En los terrenos permeables, al igual que los pozos, tienen el inconveniente de servir de drenaje, y si la excavación del túnel es definitivo, si éste es el caso, no se lleva a cabo en un tiempo prudencial, cuando se llega a estas zonas pueden haber cambiado sus características por saturación de los terrenos. Sin embargo en terrenos rocosos son muy útiles para determinar el método de arranque más rentable según la dureza de la roca, prever la velocidad de avance y el comportamiento de la roca.

3.4 OPERACIONES BÁSICAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL TÚNEL

En cualquier sistema de construcción de un túnel se puede hablar de cuatro operaciones básicas: el arranque, la carga, el transporte y el sostenimiento (o revestimiento).

En las secciones pequeñas, de 3 a 15 m², el espacio disponible es escaso y el trabajo debe obligatoriamente ser repetitivo. Este ciclo se convierte en crítico ya que una vez seleccionado el sistema de construcción es muy difícil modificarlo si surgen imprevistos.

En secciones medianas, de 15 a 50 m², es factible modificar parcialmente el ciclo en caso de una mala elección del sistema.

En las secciones grandes, mayores de 50 m², la dependencia crítica es menor aunque dado el gran tamaño de los equipos que se emplean o por cautela ante los problemas de sostenimiento, se decide la construcción en varias fases, lo cual lleva a la problemática de las secciones medias.

La excavación se puede realizar por tres métodos que son: manual, con explosivos y mecanizado.

Excavación manual

Se realiza mediante herramientas neumáticas, de potencia ligera o media según las necesidades, que van provistas de picas o paletas según sea la dureza del terreno. Con ellas se rompe el frente o se perfila, como complemento a otros sistemas. En la actualidad sólo se utiliza como único método en secciones de túneles muy pequeñas (3 o 4 m²).

Excavación con explosivos

En la actualidad el arranque con explosivos es el método que se utiliza más frecuentemente cuando el terreno es roca, ya que se adapta a cualquier tipo de dureza (roca blanda, media o dura).

La excavación utilizando la perforación y los explosivos produce inevitablemente una operación cíclica y no continua que consta de los siguientes pasos:

- Perforación del frente, siguiendo un patrón y con la profundidad adecuada para el avance previsto en la voladura (plan de voladura o tiro). - Retirada del equipo perforador. - Carga del explosivo y retirada del personal. - Detonación de las cargas. - Ventilación para eliminar humo, polvo y vapores - Desprender la roca suelta. - Realización de la entibación provisional si es necesario.

En secciones grandes, como ya se ha comentado, el avance del túnel se establece al menos en dos fases: en primer lugar la semisección superior, también llamada avance en bóveda o calota, y en segundo la semisección inferior o destroza. Si las dos fases se excavan con explosivos el ciclo se complica aún más, pero normalmente esta segunda fase se excava con maquinaria convencional, si la dureza de la roca lo permite. Este tipo de maquinaria se describirá más adelante en los métodos de excavación mecánica.

Para la perforación del frente se utilizan perforadoras neumáticas que operan con aire a presión y que pueden ser de percusión, de rotación o combinación de ambas; las hay manuales y otras que son máquinas pesadas montadas sobre jumbos (grúas móviles de caballete).

En el método con explosivos es importante el llamado plan de voladura. En la figura siguiente, el punto negro representa el taladro cargado de explosivo y la numeración indica el orden en el que se hace explotar a cada uno de ellos, lo que se consigue con detonadores retardados que se activan eléctricamente (micro retardos)

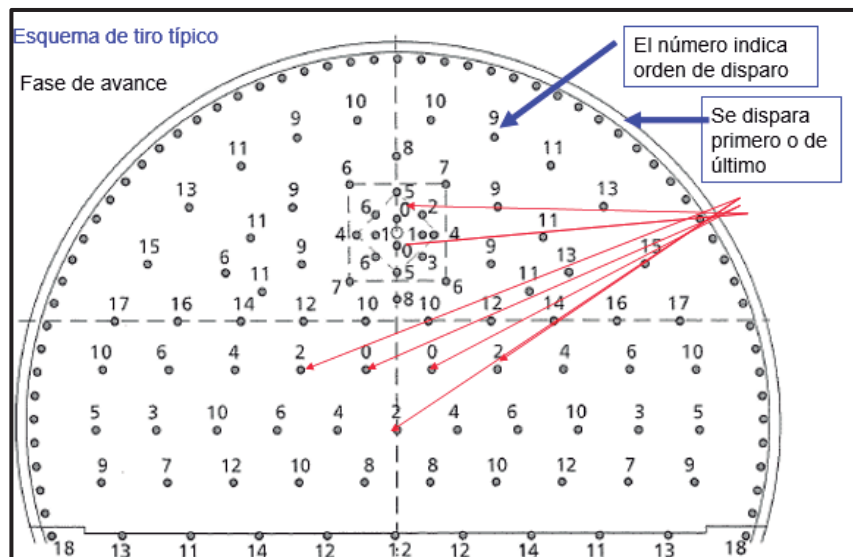


Ilustración 10 Esquema de tiro que comprende la disposición en el frente de los taladros que se van a perforar, la carga de explosivo que se va a introducir en cada uno y el orden en que se van a hacer detonar cada barreno

Según el esquema, en el plan de voladura se distinguen las siguientes partes esenciales:

- El cuele que está situado en la parte central del esquema de tiro y es la parte que primero sale en la voladura, con objeto de facilitar la salida al resto de la pega (volumen total que se pretende derribar con una voladura). En el cuele cabe destacar el taladro central, de mayor diámetro, que no se carga con explosivo y cuyo objeto es dar escape al cuele.
- El franqueo sale inmediatamente después del cuele y es el que rompe el mayor volumen de roca.
- Las zapateras son los barrenos situados en la parte central y en los extremos de la línea más baja de la sección
- El recorte, es la última fase de la pega y tiene por objeto, como la propia palabra indica, recortar el terreno circundante. Esta última fase adquiere hoy en día una mayor importancia debido a la utilización del Nuevo Método Austriaco (NMA), por lo que hay que cuidar mucho el no dañar la roca durante la voladura, pues dicho método se basa en la propia auto resistencia del terreno.

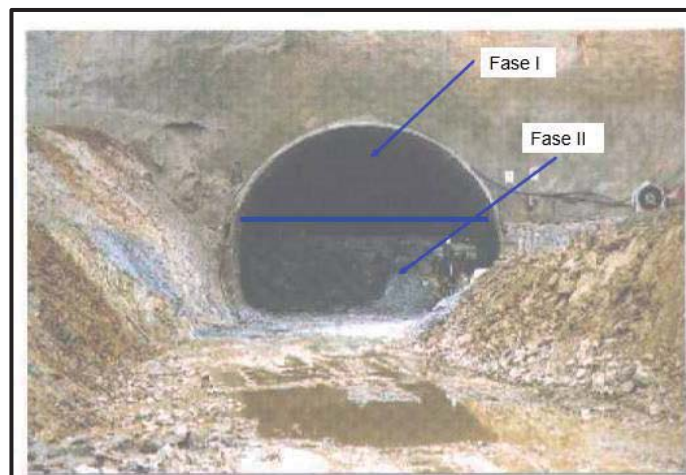


Ilustración 11 Esquema de las dos fases diferenciadas

La situación y profundidad de los taladros que se quieran efectuar está claramente acotada en el plan de tiro, de manera que, una vez marcado en el frente al menos un punto de referencia tanto altimétrica como planimétrica por el técnico topógrafo, el encargado del tajo marque mediante una plantilla dichos puntos para que sean taladrados y posteriormente cargados. Una vez efectuada la voladura, el técnico responsable de la topografía deberá comprobar la situación real del nuevo frente de excavación resultante de la voladura.

Mecánico

Se pueden diferenciar tres tipos de excavación mecánica:

Excavaciones mecánicas con Máquina: Se consideran en este grupo las excavaciones que se avanzan con máquinas rozadoras; con excavadoras, generalmente hidráulica – brazo con martillo pesado o con cuchara, sea de tipo frontal o retro-; con tractores y cargadoras (destrozadoras) e, incluso, con herramientas de mano, generalmente hidráulicas o eléctricas.

Excavación mecánica con máquinas integrales no presurizadas: Esta excavación se realiza a sección completa empleando las máquinas integrales de primera generación o no presurizadas. Otro rasgo común es que, en general, la sección de excavación es circular.

Excavación mecánica con máquinas integrales presurizadas: La baja competencia del terreno suele asociarse a casos de alta inestabilidad y presencia de niveles freáticos a cota superior a la del túnel la primera solución aplicada a los escudos mecanizados abiertos para trabajar en estas condiciones fue la presurización total del Túnel.

Transporte sobre caminos

Se utilizan vehículos pesados tipo dumper que unen a la rapidez de descarga por basculado una gran maniobrabilidad. Existe una gran gama que se adaptan a las limitaciones de sección y a las características de la cargadora adoptada.

Sostenimiento/Revestimiento

En el sostenimiento/revestimiento del túnel se emplea por lo general:

- Bulones.

El bulonado o empernado hoy en día está universalmente aceptado como método de sostenimiento provisional o definitivo.

Los bulones utilizados normalmente son barras de acero de 25 a 32 mm. de diámetro y de 3 a 4 m. de longitud y tienen como misión unir los estratos alrededor de la sección excavada para formar una bóveda natural. Los bulones quedan anclados por adherencia del mortero o resina que se introduce en el fondo y a lo largo del taladro. El extremo que queda en el exterior del taladro dispone de rosca para tuerca y arandela plana que se ajusta contra la superficie de la roca.

También existen en el mercado variantes para el valonado provisional, como por ejemplo los bulones de agua, tubos metálicos cuyas paredes se deforman contra las del taladro al inyectar agua a presión. Este sistema permite una actuación muy rápida en terrenos inestables, o bien en un valonado previo si hay agua que dificulta el fraguado de morteros o resinas. También como valonado provisional en frentes inestables, existen los bulones de fibra, que en general se fabrican con materiales plásticos fibrosos que logran un simple armado o cosido compatible con la posterior excavación del macizo.

- Cerchas.

La entibación con madera pasó de la minería a la construcción civil y, de la misma forma, los arcos o cerchas metálicas empleadas hoy en día en ingeniería civil fueron aplicados antes en la minería.

Cerchas con tablonos en el sostenimiento provisional de una galería de avance

Son viguetas de acero con sección en H y curvadas a la sección transversal del proyecto del túnel, de manera que normalmente con tres cerchas, dos en los hastiales (pies de marco) y una en la bóveda (corona), se puede cubrir la sección completa. Si hay roca poco compacta o suelta entre dos secciones con cerchas se pueden añadir tablonos (si es temporal) o planchas de acero entre éstas.

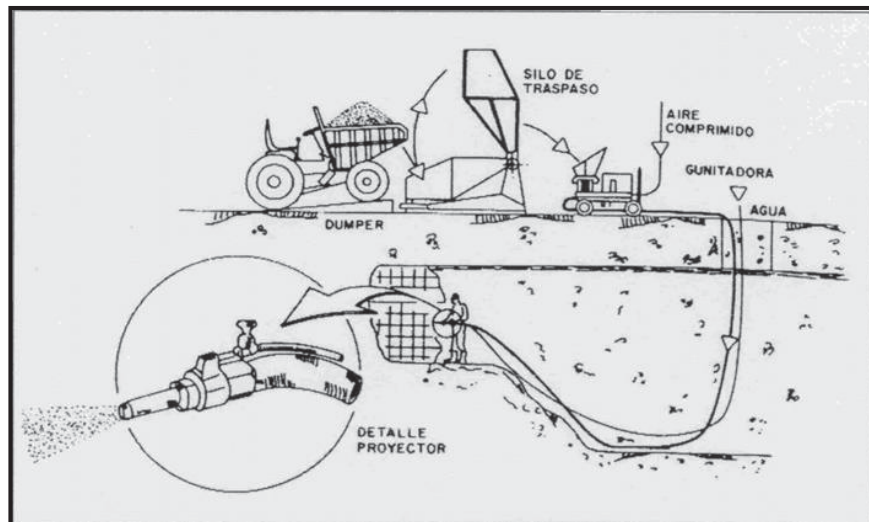
- Hormigón proyectado.

Resulta una técnica de puesta en obra interesante. Consiste en la proyección del material sobre una superficie a alta velocidad, con lo que no sólo se coloca el material sino que también se compacta. De esta forma, en una misma acción se reúnen 2 partes del proceso, con lo que se consiguen ventajas desde el punto de vista productivo.

Al producirse esta proyección, parte del material rebota al no adherirse a la superficie. Este material rebotado es una de las características de esta técnica que influye no sólo en las propiedades del material sino también en aspectos económicos.

Básicamente, en la actualidad hay 2 técnicas para realizar la proyección del hormigón que son por vía seca y por vía húmeda, las cuales dan lugar a materiales de unas características diferentes. Además existe una tercera técnica que es la vía semihúmeda y que como su propio nombre indica se queda a medio camino entre ambos procedimientos.

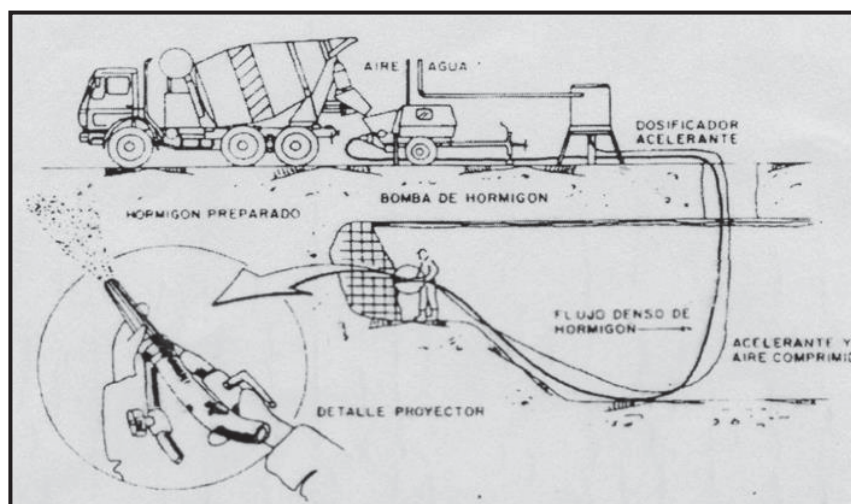
El sistema de proyección por vía seca resulta satisfactorio y ha sido hasta hace relativamente poco el método más empleado. La vía seca se caracteriza principalmente porque la mezcla entre los materiales sólidos y el agua se producen justamente en la boquilla de proyección. Los áridos, el cemento y los eventuales aditivos sólidos se vierten en la tolva de recepción, mezclados previamente, siendo estos impulsados a través de una manguera por medio de aire comprimido. A través de un dosificador paralelo, justamente en la boquilla, un operario le adiciona el agua para la hidratación del cemento.



Il·lustració 12 Hormigón proyectado por vía seca

El otro gran sistema de proyección es el de la vía húmeda, presenta variaciones tanto en lo referente a la fabricación del hormigón como a su transporte. En este caso, en la tolva de recepción lo que se vierte es ya hormigón, es decir, que antes de que se realice la proyección el material ya ha sido amasado como si se tratara de un hormigón convencional.

La impulsión del hormigón por la manguera, bien puede ser por aire comprimido o por bombeo, según si la máquina de proyección es de flujo diluido (transporte por aire comprimido) o de flujo denso (transporte por bombeo).



Il·lustració 13 Hormigón proyectado por vía húmeda



Ilustración 14 Sostenimiento mixto (cerchas, mallas y hormigón)

Hace falta comentar que aunque la utilización del hormigón proyectado sea muy óptima también hay otro tipo de métodos para el hormigonado del revestimiento:

- Hormigón Bombeado.
- Hormigón inyectado.
- Dovelas prefabricadas con inyección de trasdós.

Hormigón bombeado

El hormigón de revestimiento se coloca, mediante una bomba con pluma especial, dentro de un encofrado o rellenando una franja perimetral de terreno (Método Premill o Pretúnel). Cuando se utiliza un hormigón autocompactante no es necesario realizar vibrado. El material de revestimiento que se bombea puede ser también un hormigón polimérico.

Hormigón inyectado

Este método, por ser menos conocido y hasta el momento no utilizado en España, se describirá más en detalle por su interés técnico como método para reducir los asentamientos en túneles urbanos someros.

El método de avance continuo que consiste en colocar el revestimiento de un túnel inyectando a presión el hormigón en el interior de un encofrado, hormigón extrusionado, (extruded concrete) en una acción simultánea con los trabajos de excavación.

- 1) Preparación y colocación del encofrado y refuerzo del hormigón.
- 2) Montaje del encofrado y del refuerzo de hormigón.

- 3) Colocación del hormigón.
- 4) Extrusión del hormigón y avance del túnel.

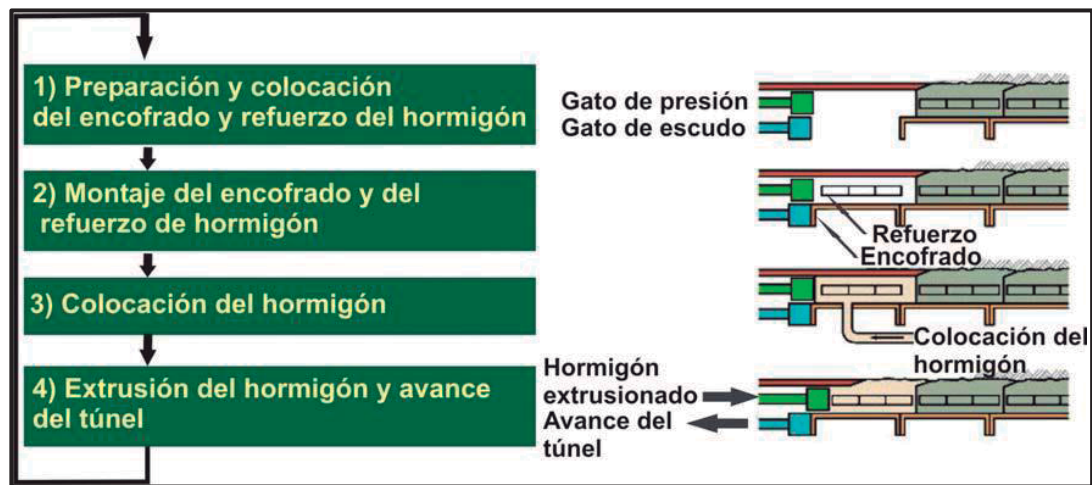


Ilustración 15 Proceso de hormigonado en cuatro etapas (con armadura)

Las cualidades de este método de hormigonado y de construcción de túneles, son las siguientes: la presión de colocación del hormigón equilibra las presiones del terreno, las hidrostáticas y minimiza los asentos del terreno. Economía en coste y reducción de plazo. Reduce las deformaciones del terreno y los asentos en superficie. Reduce los momentos flectores en el revestimiento.

Se asociará su control con la auscultación en la cual se podrá determinar las deformaciones que sufre el túnel, su asiento, como también la detección de posibles fisuras, grietas etc.

3.5 MÉTODOS DE PERFORACIÓN

Según la naturaleza del terreno se puede atacar la excavación del túnel con una determinada sección. Los terrenos sueltos (arenas, gravas) sólo permitirán avanzar mediante pequeñas secciones y provistos de blindaje. Entre estos extremos existen otros tipos de terrenos en los cuales la perforación se puede realizar por varios métodos. La selección del método constructivo de un túnel vendrá regida por una serie de factores de diversa índole:

- Unos geotécnicos, en cuanto a las características del terreno, lo que puede condicionar el aplicar un método u otro.

- Otros económicos, en cuanto a la posibilidad de utilizar métodos en que se necesita una importante inversión, como en el caso de las tuneladoras.

-Otras sociales y medio-ambientales, en cuanto a la seguridad del método, la afección al entorno, la presencia de obstáculos naturales y artificiales (ríos, pozos, cimentaciones existentes, minas, etc). Pueden enumerarse, a tal efecto, los siguientes condicionantes: Las características del terreno, junto con la profundidad a la que se quiere desarrollar la obra subterránea.

-Si existen rellenos y suelos blandos importantes, el túnel tiene que desarrollarse (en principio) por debajo de ellos, dejando un recubrimiento de terreno “resistente” del orden de un diámetro por encima de la clave. El término “resistente” puede considerarse natural o artificial (con tratamientos del terreno previos).

-La presencia de niveles freáticos colgados y continuos en el terreno pueden condicionar el método constructivo y transformarlo en una obra de túnel artificial (a cielo abierto); en general, puede decirse que hasta una profundidad de excavación en área urbana de unos 15-18- m es más económico el realizar un túnel entre pan pantallas continuas que excavada subterráneamente. El plazo de la obra, ya que ello puede obligar en algunos procedimientos (como en el Tradicional en Madrid) a abrir numerosos frentes de ataque, lo que puede encarecer la obra. O bien, puede alargarse el plazo si se necesita construir una tuneladora nueva y tiene algún condicionante especial (características de arranque, diámetro, etc). Ello puede obligar a utilizar varios sistemas – no mecanizados totalmente – para aprovechar la geometría del problema, las características geotécnicas, etc, y acortar el plazo de ejecución. La longitud del tramo, lo que puede hacer viable el uso de una TBM o no. Para túneles de varios kilómetros (5-6) de longitud puede ser rentable – o suficientemente amortizable – una TBM nueva. Pero en tramos cortos de 1-1,5 Km. Se pueden emplear tuneladoras.

El nivel tecnológico de la zona, que puede permitir el utilizar medios muy mecanizados, por existencia de personal especializado, talleres de reparación, etc, disminuyendo la mano de obra. La posibilidad de amortización de maquinaria en la propia obra u otras futuras.

Las obras con métodos de perforación tradicional lleva asociado un factor fundamental, el periodo de tiempo en realizar el cierre de la estructura. De forma general, a estos sistemas de excavación se asocian mayores magnitudes en los parámetros de control, es decir se producen mayores deformaciones en los entornos, a no ser que se lleve a cabo una rápida

sistemática constructiva en las diferentes fases de excavación mediante cierres parciales y/o apuntalamientos, lo cual en ciertas ocasiones no tiene una solución productiva sencilla. La delimitación de la zona de influencia, al igual que en el caso anterior, se ha de plantear no sólo bidimensionalmente si no que hay que tener en cuenta el entorno previo a la llegada de la excavación (50 metros por delante) y la zona que se ha dejado atrás ya con la estructura cerrada (100 metros por detrás), En este caso hay que tener en cuenta que la excavación mediante sistemas tradicionales o manuales presenta un frente abierto de varios metros en el que se incluyen distintas fases de excavación (galería de avance, avance y destroza). Según distintos métodos (Belga, Austriaco, Alemán, Madrid, etc.) dentro de estas fases de excavación pueden darse otras sub-fases en las que a veces se puede provocar o bien una reducción de tiempos hasta el cierre de la estructura o una ralentización de este, pudiendo incrementarse las distancias entre el primer punto excavado y el punto de cierre de la estructura, con ello implicando mayor zona de afección. Teniendo en cuenta esta premisa, la delimitación genérica de la zona de influencia viene a ser igual que en el anterior caso, basándose en abatir la profundidad máxima de excavación (contrabóveda) en proporción 1/1 en superficie, igualmente esta proporción puede llegar a verse afectada por los condicionantes geológico-geotécnicos del entorno.

- Previo a la llegada de galería.
- Galería de avance.
- Avance.
- Destroza.
- Cierre de estructura.

Además se sabe que la excavación mediante explosivo se compone de las siguientes operaciones:

- Perforación
- Carga de explosivo
- Disparo de la carga
- Evacuación de humos y ventilación
- Saneo de los hastiales y bóveda
- Carga y transporte de escombros
- Replanteo de la nueva tronadura

Asociado a estos hitos se debería relacionar la frecuencia tal y como se indica de forma orientativa en la siguiente gráfica

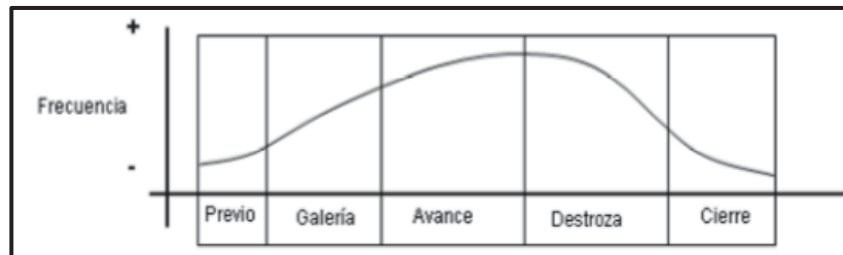


Ilustración 16 Frecuencia de control vs las diferentes etapas de construcción mediante métodos de voladura

En este caso, la velocidad de ejecución implicará una mayor zona de control, ya que un mismo entorno de seguimiento puede, incluso a lo largo de varias jornadas de trabajo, mantenerse en una sola franja de las anteriormente indicadas. Se adjunta en la siguiente tabla unas frecuencias de seguimiento “tipo” englobadas dentro de los umbrales de control.

Distancia al frente de excavación	Nivel de atención		
	Verde	Ámbar	Rojo
Entre (-50m y 100 m)	1 lectura diaria, excepto piezómetros 1 lectura semanal y convergencias 3 lecturas semanales	2 lecturas diarias, excepto piezómetros 1 lectura semanal y convergencias 3 lecturas semanales	3 lecturas diarias, excepto piezómetros 2 lecturas semanales y convergencias 1 lectura diaria
Superior a 100 m	1 lectura semanal hasta la estabilización de las lecturas, excepto piezómetros 1 lectura quincenal	2 lecturas semanales hasta la estabilización de las lecturas, excepto piezómetros 1 lectura quincenal	1 lectura diaria hasta la estabilización de las lecturas, excepto piezómetros 1 lectura semanal
Superior a 100 m y lecturas estabilizadas	1 lectura quincenal durante el mes siguiente	1 lectura semanal durante el primer mes. 1 lectura quincenal durante el segundo mes	1 lectura semanal durante el primer mes. 1 lectura quincenal durante el segundo mes

Ilustración 17 Relación entre distancia al frente de excavación y nivel de atención

Dependiendo sobretodo del terreno a excavar como tambien de los condicionantes de la propia zona (económicos, tecnológico etc) Se utilizará un método de excavación u otro. La clasificación global cae en la perforación pudiendo diferenciarse según el empleo o no de explosivos

3.5.1 MÉTODOS DE PERFORACIÓN CON VOLADURA

Método inglés

Suele utilizarse para túneles de pequeña sección (menos de 15 m²), o en muy buen terreno en secciones mayores, y por supuesto en roca.

Una solución para terrenos de inferior calidad es utilizar el ataque a plena sección pero con varios escalones de ataque. La excavación se realiza por franjas horizontales comenzando por la de la bóveda, con el inconveniente de que la evacuación del material requiere varias actuaciones hasta llegar al nivel donde se instala el sistema de transporte al exterior.



En el esquema que indica el proceso de actuación, se numeran las etapas por orden de ejecución y se redondea con un círculo la fase de sostenimiento.

Método belga

Es uno de los métodos más utilizados. Tiene la característica de ejecutar primeramente la excavación de la bóveda (es lo que se llama avance en bóveda o calota), incluido el sostenimiento que descansa directamente sobre el terreno, pues de esta manera se protege la obra por encima. Después se realiza la excavación de la parte inferior llamada destroza, comenzando por la zona central y siguiendo, en cortos tramos alternativos, por los hastiales, que una vez excavados se revisten; de esta manera no se compromete la seguridad de la

bóveda que descansa siempre sobre la destroza no excavada o sobre los pilares ya contruidos. Se termina por la construcción de la solera cuando es necesaria.



Tiene el inconveniente de que necesita vías de evacuación de escombros a diferentes niveles, con el consiguiente transvase de un nivel al inferior.

Método de las dos galerías o austríaco

Este método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y base del túnel, donde se instala una vía de evacuación que se utiliza durante toda la obra.

Cuando la galería ha avanzado cierta longitud se perfora un pozo hacia arriba y se excava en los dos sentidos una segunda galería. Una vez perforada la galería superior se sigue como en el método belga. Tiene la ventaja de que el transvase de los escombros a la galería inferior se hace por los pozos y sin modificaciones desde su situación original. También, que los múltiples frentes de ataque aceleran la construcción del túnel.



Método de las tres galerías o método alemán

Se caracteriza por la conservación de la destroza hasta la finalización del sostenimiento de la bóveda y los hastiales. Se utiliza en secciones superiores a los 50 m2. Se excavan dos galerías

en la base y a derecha e izquierda del eje; se ensanchan y se construyen los hastiales. Más atrás se ataca una galería de coronación que a continuación se ensancha hasta construir la bóveda que descansará sobre los hastiales. Por último se excava la destroza, y si es necesario se excava y se reviste la solera.



El método alemán es costoso por sus tres galerías, pero seguro en mal terreno.

Ya, a modo de conclusión, cabría comentar que el método belga es muy utilizado en túneles cortos en los que la evacuación de los escombros no es un problema importante; donde sí constituye un problema importante es en los largos túneles de montaña, por lo que se prefiere utilizar el método austriaco. En túneles con menores secciones el más utilizado es el inglés y en terrenos de baja calidad el austriaco.

Nuevo método austriaco N.A.T.M

Se basa en la idea de integrar al macizo rocoso en el sostenimiento final del túnel, para así minimizar el sostenimiento. Se deja relajar las tensiones iniciales del terreno, aceptando unas deformaciones que asumirá el sostenimiento previsto.

Debido a la implicación del macizo rocoso en el auto sostenimiento, es importante realizar la excavación con la mínima afectación posible al terreno: realizar un buen recorte, adecuar bien el explosivo a la competencia de la roca,... En macizos más alterados, colocar una capa de sellado de protección es importante para evitar más alteraciones.

Los sostenimientos son flexibles, por eso, es de vital importancia controlar la velocidad de deformación del sostenimiento, mediante una buena planificación de la auscultación.

Para alcanzar un equilibrio de deformación aceptable, se utilizan diferentes elementos de sostenimiento, tales como: cerchas metálicas, bulones, hormigón proyectado,... que, usualmente, en combinación, asumen el sostenimiento previsto.

Las fases más habituales serían las esquematizadas, siendo lo más habitual avance + destroza. En terreno menos competentes la ejecución de la contrabóveda se hace necesaria para estabilizar la sección, tanto en fase de avance como en la destroza. Y solo en casos de un macizo muy competente y con maquinaria adecuada se realiza a sección completa.

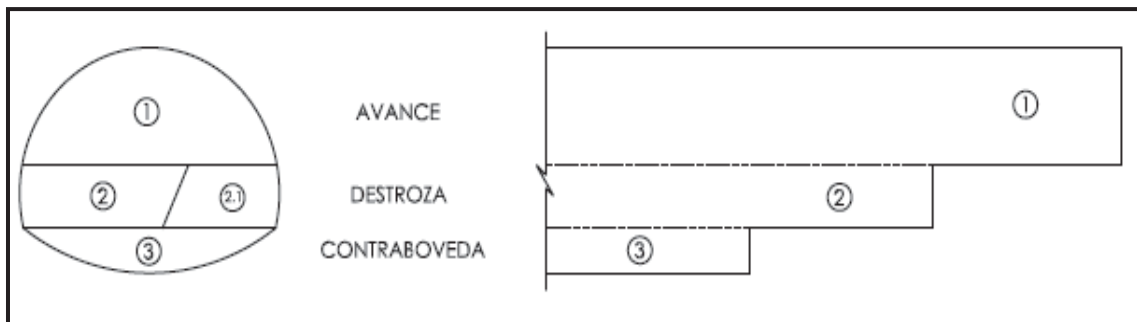


Ilustración 18 Fases de excavación típica en el NATM

La posibilidad de adoptar tanto el sostenimiento como las fases de excavación a la calidad del terreno enfrente de imprevistos, también de acometer trabajos en varios frentes, y buenos resultados en cuanto a rendimientos ha hecho que nuevo método austriaco (NATM) sea de los más utilizados y extendidos hoy en día. Pero cabe decir que para una buena aplicación de este método, el conocimiento del macizo rocoso, con un control geológico y geotécnico y el control de sus deformaciones se hace imprescindible para su correcta aplicación.

Hoy en día es un método muy extendido y utilizado, de aplicación en diversas y variadas situaciones, pero no habría que olvidar que es un método de construcción de túneles desarrollado para túneles alpinos en macizos rocosos. Así en terrenos de poca competencia como los suelos, es de difícil aplicación ya que el relajamiento de tensiones del terreno puede no ser controlable y llevar al colapso.

3.5.2 MÉTODOS DE PERFORACIÓN MECÁNICOS

Este tipo de excavación lleva implícita una alta velocidad de ejecución, por ello lleva asociada una rápida alteración de los parámetros “estables” del entorno. Estas rápidas alteraciones posibles, implica que el equipo destinado al control tenga capacidad para reaccionar ante

estas situaciones, disponiendo de suficientes recursos tanto materiales como humanos. Por todo ello, no sólo hay que tener en cuenta la zona de afección mediante el análisis bidimensional del entorno (profundidad de excavación - ancho de cubeta), si no que se ha de valorar las zonas previas al paso de la excavación (50 metros delante del frente) y las que se han excavado ya (100 metros por detrás del frente). Manteniendo como referencia, para delimitar las zonas de influencia, los más 50 metros (por delante de la excavación) y los menos 100 metros (por detrás de la excavación), la delimitación de la zona de influencia en superficie se basa en abatir la profundidad máxima de excavación (contrabóveda) en proporción 1/1 en superficie, al igual que en anteriores casos esta proporción puede llegar a verse afectada por los condicionantes geológico geotécnicos del entorno. El planteamiento tipo de la auscultación en este tipo de infraestructuras sería el siguiente:

- Control de entornos.
- Control de movimientos tanto de superficie como de paramentos verticales existentes (movimientos verticales, bidimensionales y tridimensionales)
- Control de la evolución de posibles grietas y/o fisuras existentes.
- Control de movimientos profundos en terreno (control de movimientos en cimentaciones existentes). Horizontales, verticales y/o mixtos.
- Control de niveles de agua.
- Al igual que anteriores situaciones, se debe asociar con cada fase de excavación una sistemática de seguimiento a implementar, en el caso de excavación mecánica los hitos a tener en cuenta han de ser los siguientes:
 - Deformaciones previas a la llegada del frente.
 - Frente de excavación.
 - Paso del backup. Asociado a estos hitos se debería relacionar la frecuencia tal y como se indica de forma orientativa en la siguiente gráfica.

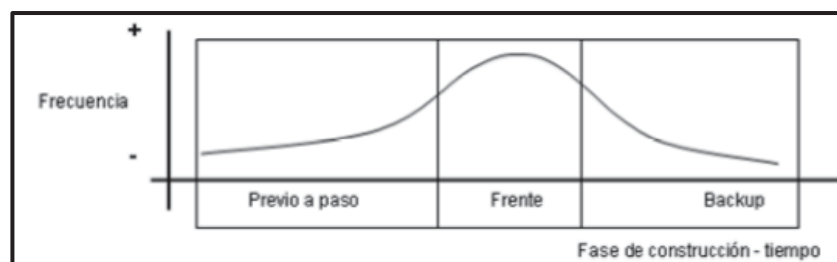


Ilustración 19 Frecuencia de control vs las diferentes etapas de construcción mediante tuneladora

En este caso en concreto la velocidad de ejecución, implica una mayor intensidad en la frecuencia de lecturas, ya que un mismo entorno de seguimiento puede, incluso a lo largo de una sola jornada de trabajo, pasar por las tres fases anteriormente diferenciadas. Se adjunta en la siguiente tabla unas frecuencias de seguimiento “tipo” englobadas dentro de los umbrales de control.

Distancia al frente de excavación	Nivel de atención		
	Verde	Ámbar	Rojo
Entre (-50m y 100 m)	1 lectura diaria, excepto piezómetros 1 lectura semanal	2 lecturas diarias, excepto piezómetros 1 lectura semanal	3 lecturas diarias, excepto piezómetros 2 lecturas semanales
Superior a 100 m	1 lectura semanal hasta la estabilización de las lecturas, excepto piezómetros 1 lectura quincenal	2 lecturas semanales hasta la estabilización de las lecturas, excepto piezómetros 1 lectura quincenal	1 lectura diaria hasta la estabilización de las lecturas, excepto piezómetros 1 lectura semanal
Superior a 100 m y lecturas estabilizadas	1 lectura quincenal durante el mes siguiente	1 lectura semanal durante el primer mes. 1 lectura quincenal durante el segundo mes	1 lectura semanal durante el primer mes. 1 lectura quincenal durante el segundo mes

Ilustración 20 13 Relación entre distancia al frente de excavación y nivel de atención

Distinguiremos los métodos en los que se utiliza la maquinaria convencional, las tuneladoras y las rozadoras.

Máquinas convencionales

En terrenos de roca media o blanda, y en secciones medias y grandes, un método mecanizado es el convencional con tractores (bulldozer) dotados de ripper, y para terrenos de mayor dureza, palas cargadoras. Existen también versiones de estas máquinas, de gálbo mínimo o brazos cortos, que solucionan los problemas de espacio.



Ilustración 21 bulldozer con ripper

Tuneladoras

Podemos definir la tuneladoras como máquinas que realizan la excavación a plena sección mediante la acción directa y continuada de útiles o herramientas de corte. Este tipo de máquinas llevan integrado desde el primer momento el revestimiento al proceso constructivo, mediante la colocación sistemática del mismo detrás de la máquina. Se dividen en dos tipos:

b.I) Máquinas topo (TBM, Tunnel Boring Machine)

Se utilizan para excavaciones en roca de dureza baja, media o alta. Podemos decir que excavan el frente de roca a plena sección mediante la acción combinada de la rotación y el empuje continuados de una cabeza provista de herramientas de corte convenientemente distribuidas en su superficie frontal. El dispositivo de empuje acciona contra el frente y reacciona contra unos codales extensibles o grippers.

Los útiles de corte van montados en la cabeza que gira y empuja contra la roca y que desmenuza el material en fragmentos. Estos son cargados en el frente mediante unos cangilones y depositados en la parte trasera de la cabeza sobre una cinta transportadora que lo transfiere a otro sistema de transporte que lo extrae al exterior.

Tipos de cortadores La tecnología actual permite fabricar topes desde 2,5 m de diámetro hasta 12 m, también se fabrican topes dúplex formados por uno piloto de 3 a 4 m de diámetro combinado con una cabeza ensanchadora de hasta 12 m. Son muy útiles en galerías de pendiente muy inclinada en las que la excavación se realiza de abajo hacia arriba con el topo piloto, para posteriormente ser ensanchada en la dirección contraria.

Un topo puede llevar bulonadoras o empernadoras que trabajan según se avanza, o mecanismos para colocar cerchas metálicas. También se puede preparar para el revestimiento con dovelas prefabricadas de hormigón en el caso de que se esperen grandes deformaciones de la roca.



Ilustración 22 TBM con topes

El rendimiento del avance con topo suele estar entre 1,5 y 2,5 m/h. Sin embargo una de las desventajas mayores que presenta respecto a otros métodos es la falta de flexibilidad cuando se producen incidencias por accidentes geológicos o por fuertes aportaciones de agua, debido a la longitud importante de toda la estructura que le acompaña (hasta 300 m). Esta longitud es la que limita el radio de las curvas, que no conviene que sean menores de 100 m.

b.2) Los escudos

Se utilizan para la excavación de roca con dureza muy blanda y suelos. Como su propio nombre sugiere, un escudo es una estructura rígida y resistente que, introducida dentro del túnel, proporciona, un área estable y segura en la zona del frente de trabajo, protegiendo a éste contra el colapso en la bóveda y los hastiales e incluso contra el colapso del propio frente de excavación.

Este concepto se ha ido transformando a lo largo de los años en un nuevo concepto y diseño de escudo-máquina que realiza también la excavación mecánica del terreno.

Al ser el terreno en el que se mueven inestable, el sostenimiento se va colocando en el propio frente y son, sin excepción, prefabricados y formados generalmente por dovelas de hormigón.

Los escudos consiguen el empuje longitudinal mediante reacciones contra el último anillo del revestimiento, por medio de gatos hidráulicos situados alrededor de la periferia de la parte trasera.

Cada gato hidráulico puede funcionar independientemente o en grupo, lo que permite hacer correcciones a la alineación de avance si es necesario. Están contruidos de modo que sean capaces de hacer avanzar el escudo una distancia igual al ancho de los anillos del revestimiento.

Una vez completada esta parte del ciclo se coloca el revestimiento en la zona que ha quedado libre detrás de la cola del escudo.

A los escudos se les puede acoplar distintos sistemas o útiles de excavación según el tipo de terreno (brazo excavador con cuchara, con martillo, cabeza giratoria circular, rozadoras, cuchillas), e incluso permiten la excavación manual en secciones de pequeño diámetro.

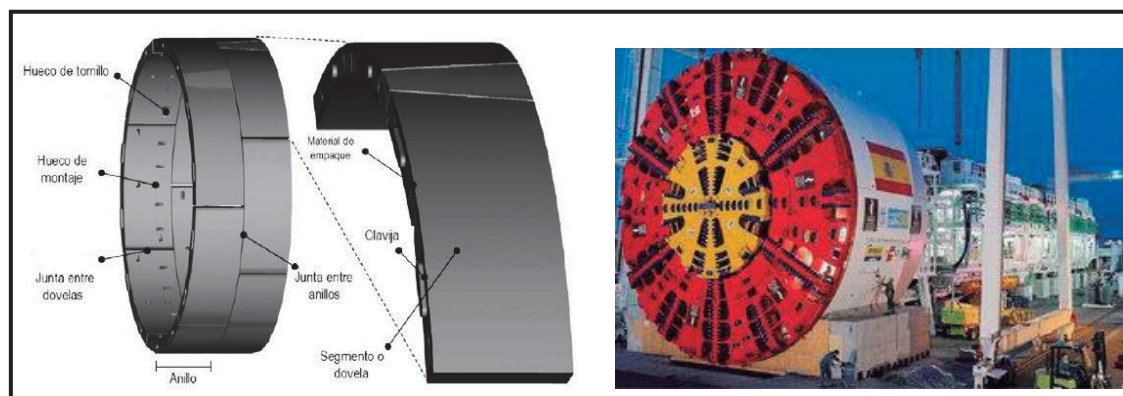


Ilustración 23 Esquema de anillo de revestimiento y EPB

Las limitaciones de pendiente vienen impuestas por el sistema de transporte del escombro elegido, siendo válido lo dicho anteriormente para los topes.

En cuanto a las curvas, los escudos con longitudes similares a las de la estructura que les acompaña, son más problemáticos que los topes, pues los radios muy cortos obligan a un diseño sofisticado de dovelas. Como criterio general puede decirse que un escudo de

determinado radio puede admitir radios del trazado iguales o menores a 80 veces el suyo propio.

Y por último cabe señalar el equipo de desescombrado. Los escombros son arrastrados por una cinta transportadora a la parte trasera del escudo, donde son cargados en el sistema de evacuación que los extrae al exterior y que suele ser un tren de vagones sobre carriles, ya que al ser el revestimiento de dovelas es fácil fijar a ellas una vía pesada para el uso de vagones de gran capacidad.

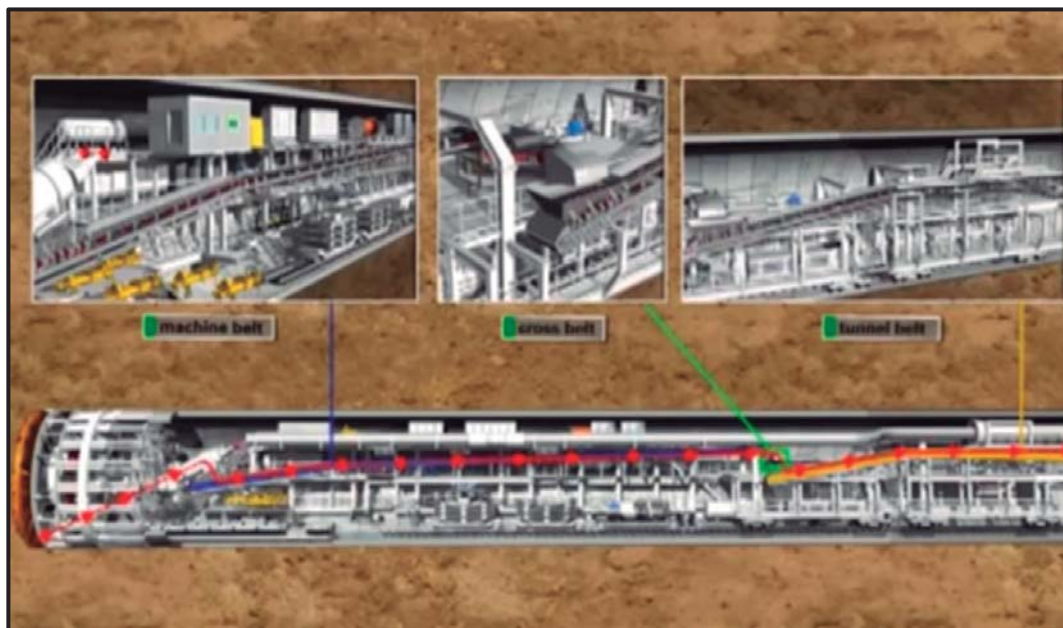


Ilustración 24 Sistema de descombrado EPB

Rozadoras

Una rozadora es una máquina excavadora provista de un brazo articulado en cuyo extremo va montado un cabezal rotatorio que dispone de herramientas de corte de metal duro llamadas picas.

Estas máquinas, denominadas de ataque puntual, producen la desagregación de la roca con las picas que van situadas en la cabeza rotativa, que se mantiene presionada contra el frente con toda la potencia del motor de corte, actuando como fuerza de reacción el propio peso de la máquina.

Existen dos sistemas distintos de corte, el llamado de ataque frontal (Ripping) y el de ataque lateral (Milling). En el primero el cabezal de corte gira perpendicularmente al brazo soporte,

por lo que la fuerza del corte se aplica principalmente de un modo frontal permitiendo atacar rocas de dureza alta.



Ilustración 25 Rozadora de eje transversal y de eje longitudinal

En el ataque lateral el cabezal es cilíndrico o tronco-cónico y gira en línea con el eje del brazo soporte, por lo que la fuerza de corte se aplica lateralmente, no aprovechándose todo el peso de la máquina como fuerza de reacción; sin embargo, para la minería tiene la ventaja de poder extraer el mineral en vetas estrechas sin afectar a la roca encajante, ya que el cabezal de corte tiene dimensiones más reducidas. No hay que olvidar que el desarrollo de estas máquinas proviene de la minería.

Las rozadoras disponen de distintos sistemas de recogida de escombros que, complementados con la utilización de pequeñas cargadoras, los traslada a la parte trasera de la máquina para ser cargados y extraídos al exterior, normalmente por maquinaria sobre neumáticos (palas cargadoras y camiones).

Rozadora (Milling) → carga de escombros de carrusel con paleta

Rozadora (Ripping) → con brazo rozador y recolector

En relación con las condiciones anormales del terreno, las rozadoras presentan indudables ventajas frente a otros sistemas mecanizados, por su gran movilidad. Tanto si la máquina se ve rebasada por una excesiva dureza de la roca, que obliga al empleo de explosivos, como si aparecen rocas muy blandas, que recomiendan el empleo transitorio de excavadoras o métodos manuales, las rozadoras permiten dar paso inmediato a estos sistemas. También se adaptan fácilmente a cualquier tipo de sostenimiento.

Soluciones para el cambio de vagones

Se puede hablar de seis variantes para el cambio de vagones:

- a) Se dispone un apartadero fijo lo más próximo al frente.
- b) Es el llamado cambio californiano que dispone de dispositivos hidráulicos para adelantarlo según progresa el frente.
- c) Proviene de la minería y se trata de un elevador de vagones vacíos, que permite el acceso de éstos a la zona de carga. Su limitación es la falta de gálibo en secciones pequeñas.
- d) Una cinta elevada bajo la cual se sitúa el tren de vagones vacíos. Es la solución más frecuentemente adoptada cuando el arranque se hace con tuneladoras.
- e) Vagones autocargables que transvasan el escombros de uno a otro, o bien, monovagones de gran longitud y fondo móvil; son soluciones útiles para secciones pequeñas.
- f) El transporte se realiza en vagones pero la carga se hace con palas cargadoras de vuelco lateral.

3.6 AUSCULTACIÓN INTERNA EN TÚNELES Y EXCAVACIONES

De la necesidad de tener un control absoluto del comportamiento del conjunto obra-terreno-edificación circundante, para hacer frente al riesgo que entraña construir dentro de un medio heterogéneo como es el terreno, surge la auscultación. Permite garantizar la correcta ejecución de la propia obra y la integridad estructural de las construcciones vecinas y permite la detección de problemas con anterioridad a que éstos ocurran, con lo que se puede actuar para evitarlos. Podemos dividir la auscultación en diferentes tipos:

Medida de convergencias

Con el fin de conocer los posibles movimientos relativos entre puntos de una misma sección de un túnel se colocan secciones de convergencia formadas por, dianas reflectantes (leídas mediante estación total) o por pernos de convergencia, leyéndose los movimientos relativos entre dichos puntos mediante la cinta de convergencias. La cinta extensométrica es un instrumento portátil que permite medir desplazamientos entre pares de pernos de referencia

anclados en la estructura o excavación. Los pernos se encuentran, permanentemente fijos para asegurar la precisión y fiabilidad de las lecturas. La cinta extensométrica se compone de una cinta de medición de acero inoxidable perforada; cuyos orificios están espaciados de manera equidistante y precisa. El extremo fijo de la cinta está ajustado al carrete integrado en un cuerpo de peso ligero, el cual, presenta un gancho posicionador de referencia idéntico al que está en el extremo libre de la cinta. El cuerpo incorpora un dispositivo tensionador acoplado a una escala de deslizamiento y un indicador analógico o digital

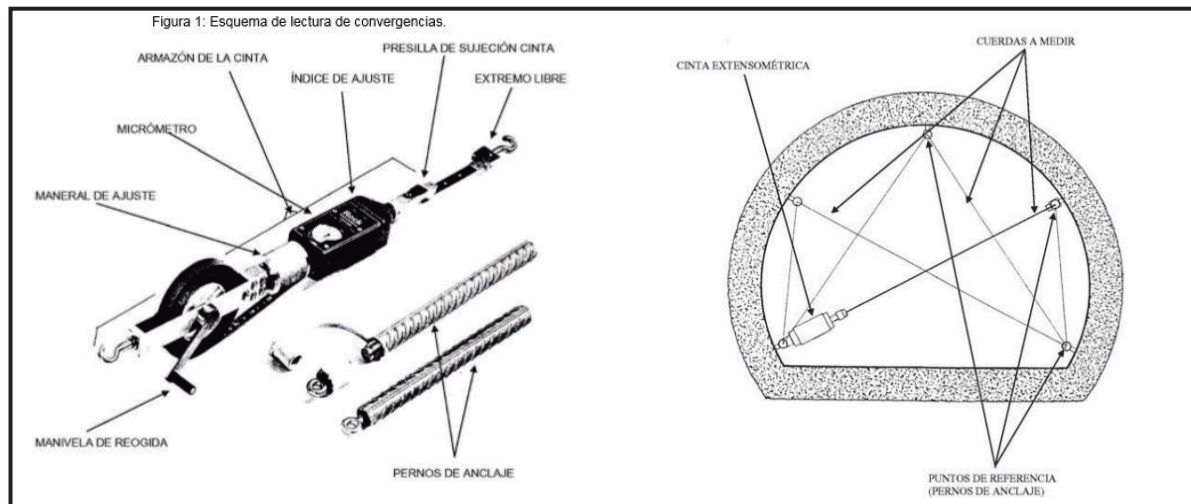


Ilustración 26 Auscultación de túnel con convergencias

La tensión de cinta se ajusta mediante la rotación de un collar estriado hasta que la línea blanca en el indicador del aparato y el bloque de anclaje elástico interno estén alineados de manera precisa. La lectura se tomará mediante la anotación de la posición de orificio localizado en la cinta en el extremo del instrumento y añadiendo la lectura de la escala interna. El rango de las cintas es de 1 a 30 mts. y la precisión es de 0.01mm

Extensómetro de varillas

Para la medida de deformaciones del terreno en profundidad generalmente se utiliza el Extensómetro múltiple para medición de movimientos según la dirección de un taladro (sistema varilla). El aparato consta de una serie de anclajes a distintas profundidades unidos a la cabeza sensible mediante varillas roscadas entre sí, que permiten medir con gran precisión los movimientos producidos en la dirección del eje del taladro. El taladro puede tener cualquier inclinación, desde la horizontal a la vertical. Las varillas van situadas dentro de tubos de polietileno y los anclajes se unen a la roca mediante lechada de cemento. El

diámetro del taladro depende del número de anclajes. El extensómetro es apto para medir deformaciones tanto en suelos como en rocas, variando el tipo de inyección de acuerdo con la naturaleza de la roca. En el caso de suelos solo se inyecta la zona de anclajes rellenándose el resto de arena.



Ilustración 27 Extensómetro de varillas

Células de presión

La medida de las presiones/deformaciones relativas se puede realizar de forma indirecta, instalando aparatos que midan la deformación global de la roca o del suelo en una o varias direcciones. En este apartado trataremos aquellos medidores que suministran directamente la variación de presión/deformación desde el momento de su montaje. Dentro de los medidores de presión relativa destacaremos los siguientes: ? Células de presión total. ? Células de carga.

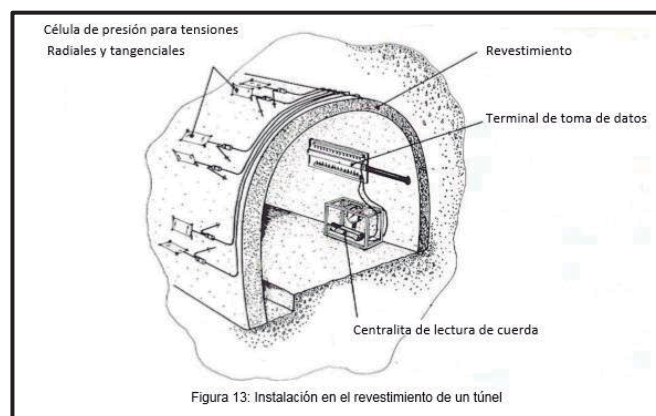


Ilustración 28 Ubicación gráfica de los sensores

Se trata de sensores precisos, robustos, fiables y estables durante largos periodos de tiempo. En el caso de las de cuerda vibrante permite medir rangos de presión de tipo bajo, medio y alto (más de 150 Bar); en las hidráulicas y neumáticas tan solo rangos bajos y medios. Los cables de conexión de las de cuerda vibrante son flexibles y resistentes permitiendo precisión en las todas las células la influencia de la temperatura debe ser considerada a la hora de interpretar los valores recogidos lecturas para distancias de más de 1000 metros; mientras que en el caso de los tubos de las células neumáticas e hidráulicas no son recomendables para longitudes de más de 500 metros.

3.7 INNOVACIÓN

La ingeniería de túneles ha progresado de forma muy significativa durante el siglo XX y lo que llevamos de XXI. Entre los principales factores que han contribuido decisivamente a este avance se encuentran los siguientes:

- En relación con la excavación, las mejoras en las técnicas de voladura, tanto en la fase de barrenado como en los tipos de explosivos, el uso cada vez más eficiente de la energía, sea eléctrica o por aire comprimido; así como la introducción de nuevos equipamientos y maquinaria, dependiendo de las características del terreno (tema del que nos ocuparemos más en profundidad en los siguientes puntos), como son las máquinas tuneladoras (TBM), las rozadoras o tuneladoras de ataque puntual, escudos, etc ha sido determinante.
- En relación con el sostenimiento, los avances en materia de revestimientos, principalmente en hormigón y acero moldeado, en mejora del terreno mediante inyecciones a presión así como el perfeccionamiento de máquinas tuneladoras a sección completa.
- En relación con las características del entorno de trabajo, cabe resaltar las notables mejoras en sistemas de ventilación e iluminación, un control más eficaz del agua subterránea mediante equipos de bombeo o a través de sobrepresión ambiental.
- En relación con los métodos de diseño y construcción de entre los diversos métodos que anteriormente se apuntaron, cabe destacar el Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles (NATM)

El objetivo de este apartado es recopilar y analizar los nuevos materiales y técnicas de nueva generación, que se utilizan o se utilizarán en un futuro próximo en el revestimiento de túneles.

En un lugar destacado figura una amplia variedad de fibras que adicionándolas al hormigón consiguen mejorar su comportamiento estructural, su resistencia frente al fuego y aumentan la durabilidad.

Merecen una mención especial también los nuevos hormigones y sus técnicas de colocación como son: los compuestos cementíticos, los hormigones proyectados sin acelerante, los hormigones autocompactantes y los hormigones poliméricos.

Por su potencialidad, la utilización de polímeros líquidos bicomponentes proyectados que, al contacto entre ellos, fraguan en pocos segundos formando una membrana de gran resistencia de poliuretano y/o poliurea, abren las puertas para la optimización de la impermeabilidad de los revestimientos.

Se destaca también la utilización de materiales sintéticos de fibra continua de vidrio, basalto, aramida y carbono en la fabricación de materiales no sujetos a la corrosión y de un peso más ligero como: barras, mallazos 2D y 3D y láminas.

Estos materiales enumerados son el eslabón entre los materiales tradicionales que se han venido utilizando como refuerzo de hormigones y los nuevos materiales que surgirán de la utilización de la nueva tecnología llamada Nanotecnología que, presumiblemente, en el horizonte de 2030 alumbrará nuevos materiales, de nuevas propiedades desconocidas hasta el presente y que contribuirán a construir túneles más seguros y económicos.

Nuevos tipos de fibras

Actualmente existe en el mercado una amplia variedad de fibras que se utilizan para mejorar las propiedades de los diversos materiales utilizados en distintos campos de la industria, dando lugar a los llamados materiales compuestos. Los hormigones que se utilizan en la construcción son, en sí mismos, materiales compuestos; acentuándose este carácter con la adición de fibras que consiguen mejorar sus cualidades, principalmente su comportamiento estructural, su ductilidad y su durabilidad.

Los diversos tipos de fibras pueden clasificarse, atendiendo a diferentes factores:

- Naturaleza de los materiales (orgánicas, inorgánicas)
- Método de fabricación (sintéticas, naturales)
- Resistencia (estructurales, no estructurales)

FIBRAS ESTRUCTURALES

Se consideran Fibras Estructurales aquellas que son más resistentes y tienen un módulo de elasticidad de Young superior a 25 Gpa y mayores resistencias a la tracción. En la figura se comparan el módulo de elasticidad Young, la resistencia a tracción y la deformación de algunas de las principales fibras estructurales con los de los tradicionales refuerzos de acero.

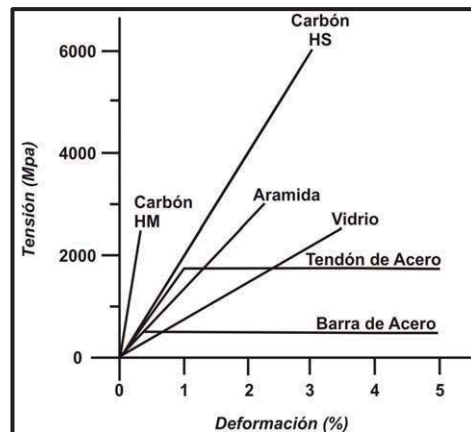


Ilustración 29 Relación módulo de Young, resistencia a tracción y deformación

Las fibras más resistentes son las de Carbono y Aramida. La fibra de Basalto ocupa una posición intermedia entre la fibra de Vidrio y la de Aramida, muy próxima a ésta. Las fibras de Acero tienen un módulo de elasticidad elevado (200 Gpa), únicamente superado por las fibras PAN de Carbono de alto módulo (HM); sin embargo, su resistencia a la tracción es muy inferior (1,2 Gpa) frente a otras fibras como las de Carbono (hasta 4,8 Gpa), Aramida, Basalto y Vidrio (hasta 4,7 Gpa).

Fibra sintética de carbono

Se fabrican a partir de dos tipos de materiales: polímeros textiles como el rayón o el poliacrilonitrilo (PAN) y alquitranes cuya procedencia puede ser de las refinerías de petróleo o del carbón. Este tipo de fibras puede alcanzar módulos de elasticidad Young de hasta 1000 Gpa. Fibra sintética de Carbono Las propiedades que confiere al hormigón son: elevada resistencia a tracción y a flexión, mayor resistencia a la fisuración, gran durabilidad, menor

densidad, estabilidad química, resistencia a la corrosión, a los ácidos y a los álcalis, resistencia a altas temperaturas y resistencia a las vibraciones, seísmos y explosiones.

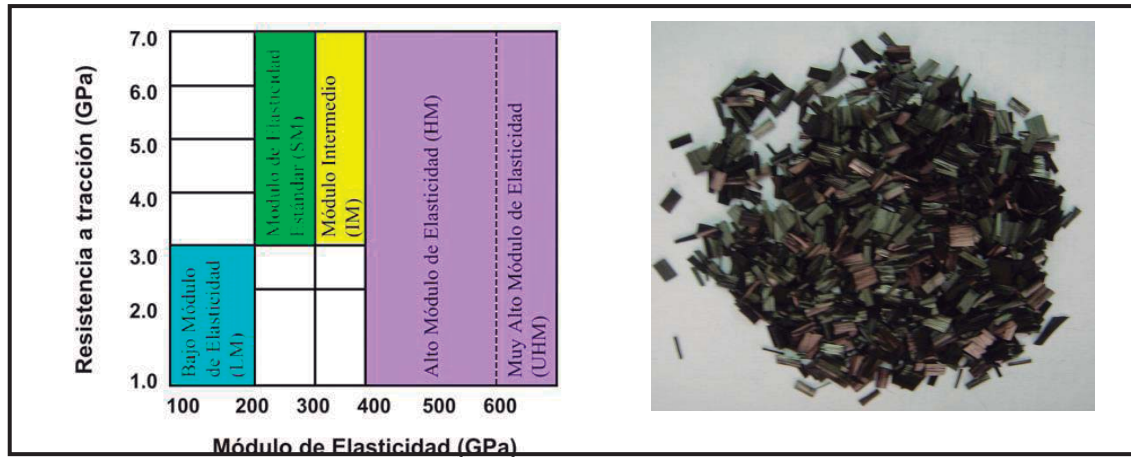


Ilustración 30 Resistencia a tracción de las fibras de carbono en relación con su módulo de elasticidad.

La utilización en el campo de la Ingeniería civil esta limitada actualmente, por su elevado coste, a construcciones emblemáticas (puentes y edificios). En un futuro próximo se emplearán como refuerzo de revestimientos para hacerlos más resistentes, durables y resistentes a los seísmos. También en reparaciones y refuerzos puntuales de revestimientos deteriorados. La utilización de fibras de carbono, en una proporción de 0,2%-0,4% en volumen en sostenimientos y revestimientos permite, por su conductividad eléctrica, convertir a estos en "inteligentes". Las variaciones de resistividad al paso de una débil corriente eléctrica, permite conocer el grado de fisuración del hormigón, aumentando su resistividad con el incremento de la fisuración y de la fracturación de éste.

Fibra sintética aramida

Las fibras de Aramida comenzaron a fabricarse a partir de co-polímeros a través de diferentes procesos.

Las propiedades que confiere al hormigón son: elevada resistencia a tracción, gran tenacidad, comportamiento elasto plástico, dúctil, eliminación de fisuras, resistente a flexión, resistente a la corrosión y a la oxidación.

Su campo de aplicación es similar a las fibras de carbono. Por el momento, su utilización en el campo de la ingeniería civil está limitada, por su coste elevado, a la fabricación de cables de anclaje, elementos de pretensado y geomallas. En un futuro próximo, con la reducción de sus

costes de producció, estas fibras, solas o en combinació con otro tipo de fibras, se utilizarán como refuerzo de hormigones más tenaces y dúctiles, compatibles con deformaciones superiores al 4%

Fibra inorgánica de basalto

La fibra natural de basalto se fabrica de la roca basalto (lava volcánica solidificada), por fusión en un horno calentado por gas a 1580° C. La roca fundida se bate mediante un proceso de centrifugación. Se producen fibras de 60 a 100 mm de longitud con un diámetro entre 7 y 13 micras.



Ilustración 31 Fibra inorgánica de basalto

Las propiedades que aporta a los hormigones son: alta resistencia a tracción, mayor módulo de elasticidad, elevada tenacidad, alta durabilidad, resistencia a elevadas temperaturas (982°C), resistencia a los ataques químicos y a los ácidos, resistente a las vibraciones, sismos y mejor acabado superficial.

En hormigones de revestimiento como único refuerzo o como complemento a las armaduras de refuerzo, en hormigones en masa o armados (dovelas), en hormigones a los que se les exija una gran durabilidad, en hormigones resistentes al fuego, a las vibraciones, a los sismos y a las explosiones.

Fibra inorgánica sintética de vidrio

Se fabrican por extrusión del vidrio fundido al hacerlo pasar por una especie de tamices. En forma pura es un molímero (SiO₂)_n. En su forma más frecuente presenta una estructura tetraédrica, con los átomos de oxígeno situados en los vértices del tetraedro y el átomo de silicio situado en el centro del tetraedro. Por su estructura amorfa, las propiedades de la fibra son las mismas en la dirección de ésta que en la dirección perpendicular.

En hormigones de revestimiento como único refuerzo o como complemento a las armaduras de refuerzo, en hormigones en masa o armados (dovelas), en hormigones a los que se les exija una gran durabilidad, en hormigones resistentes al fuego, a las vibraciones, a los seísmos y a las explosiones.

Las propiedades que añade al hormigón son: incrementa notablemente la resistencia a flexotracción (25%), aumenta la tenacidad y ductilidad, evita la fisuración posterior del fraguado, mejora la durabilidad, mejora el acabado superficial. Se usan en la fabricación de elementos prefabricados de hormigón (GRP, GRE, GRC) y en hormigones de revestimiento para incrementar su resistencia al fuego, sudurabilidad y su resistencia a los efectos sísmicos. También se está empezando a emplear en revestimientos “inteligentes”, utilizando la conductividad eléctrica de las fibras para determinar el grado de fisuración en función de la variación de su resistividad.

Nuevas fibras metálicas

Nos referiremos ahora a una nueva generación de fibras metálicas diseñadas para conseguir unas propiedades óptimas, mejorando la geometría, el tamaño, sus propiedades mecánicas y su compatibilidad con la matriz de cemento. Una de las fibras desarrolladas es la denominada Torex, actualmente llamada Helix. Esta fibra está fabricada con acero de muy alta calidad y diseñada con una forma y tamaño optimizados, de forma que se consigue una gran trabazón entre ella y la matriz de cemento.

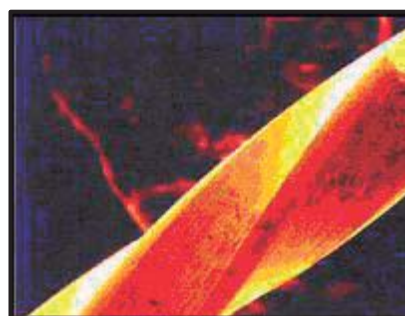


Ilustración 32 Fibras Torex torsionadas

En la figura se representan las curvas tensión-deformación para un hormigón reforzado con una fibra normal (a) y con una fibra Torex (b); en el segundo caso se ha desarrollado una zona (II) en la que el hormigón desarrolla una tensión creciente hasta el punto de rotura con un máximo σ_{pc} y con una deformación ε_{pc} ; el hormigón manifiesta un comportamiento

“strain hardening” y desarrolla una energía de deformación representada por el área sombreada de la zona (II), que representa la medida de su tenacidad.

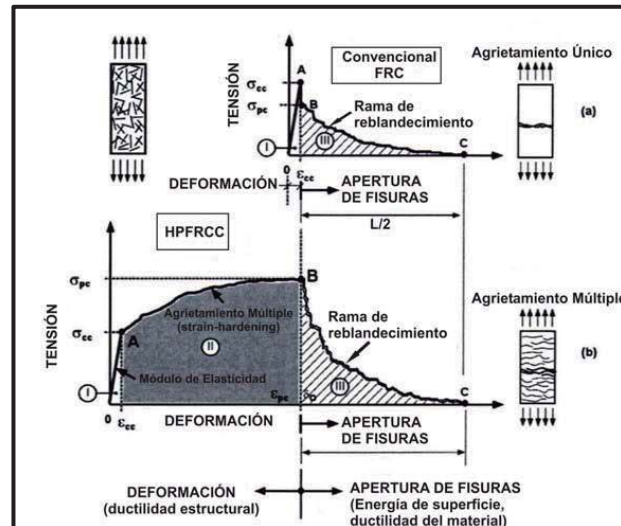


Ilustración 33 urvas tensión-deformación para un hormigón reforzado con una fibra normal (a) y con una fibra Torex (b); en el segundo caso se ha desarrollado una zona (II) en la que el hormigón desarrolla una tensión creciente hasta el punto de rotura con un máximo σ_p

Este tipo de fibra, básicamente triangular y torsionada, proporciona al hormigón las siguientes propiedades: incrementa la trabazón entre las fibras y la matriz de cemento, eleva sensiblemente la resistencia a tracción, a flexión, la ductilidad y la tenacidad. Tiene un comportamiento “deformación-tensión” (strain-hardening). Capacidad de absorción de energía de impacto. Evita las fisuraciones en el proceso de endurecimiento. Resistente a la abrasión. No resistente a la corrosión. Especialmente indicado en hormigones sometidos a fuertes presiones y deformaciones (fluencia, squeezing, swelling severos) Fibra sintética de alcohol de polivinilo (pva) Es una fibra sintética fabricada a partir del alcohol de polivinilo, $(C_2H_4O)_n$, después de un proceso de endurecimiento con formol.

FIBRAS NO ESTRUCTURALES

Hay otro tipo de fibras menos resistentes que las fibras estructurales, pero que proporcionan a los hormigones unas propiedades muy interesantes como: resistencia a la corrosión, a los álcalis y a los ácidos, incremento de su ductilidad, reducción de la fisuración de fraguado....

Se consideran fibras no estructurales aquellas que tienen un módulo de elasticidad Young ≤ 25 Gpa. A este grupo pertenecen todas las fibras sintéticas termoplásticas orgánicas fabricadas fundamentalmente a partir del polipropileno.

Fibras de polipropileno

Las fibras macro-sintéticas se fabrican con polipropileno 100% puro; algún tipo de fibra, como la ENDURO 600, se refuerza con polietileno.

Existen en el mercado diferentes tipos de macro-fibras; su densidad varia entre 0,91- 0,92, pudiendo llegar hasta 1,14. Tienen una forma sinusoidal que mejora su trabazón con la matriz de cemento.



Ilustración 34 Fibra Forta-Ferro

Las propiedades que aportan al hormigón son: mayor ligereza, mejor adherencia, incrementa la ductilidad del hormigón, resistente a la corrosión, al ataque químico de álcalis y ácidos. Incremento importante de la durabilidad. Resistencia pasiva al fuego con dosificaciones de 2kg/m^3 . Elimina o reduce las fisuraciones en el proceso de endurecimiento del hormigón con dosificaciones de $5\text{ kg/m}^3 - 8\text{ Kg/m}^3$. Incremento, proporcional a la cantidad de fibras utilizadas, de la tenacidad, resistencia residual, resistencia al impacto y resistencia a la flexión. Mejor calidad de acabados superficiales. Alta capacidad de absorción de energía, superior a 1000 Julios, con una elongación máxima de 25 mm, con dosificaciones de 7 kg/m^3 . Resistente a la fracturación (strain-hardening) con dosificaciones de fibra $> 5\text{ kg/m}^3$.

Fibras de poliolefinas impregnadas con resina

Este tipo de fibra se fabrica a partir del polipropileno y/o polietileno de muy alta calidad, que finalmente se impregna con una capa de resina. Se ha incorporado muy recientemente al mercado, bajo patente americana con el nombre comercial Barchip. La fibra tiene un perfil corrugado que favorece muy notablemente su trabazón con el hormigón.

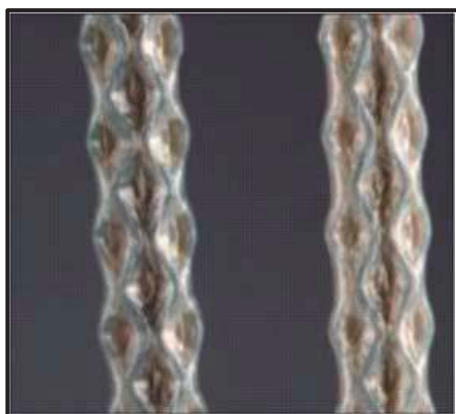


Ilustración 35 Fibra poliolefinas impregnadas de resina

Aporta las siguientes ventajas: hormigón más ligero, elimina o reduce la fisuración en el proceso de endurecimiento del hormigón con dosificaciones de fibra de 3Kg/m^3 a 5Kg/m^3 . Tenacidad a flexión similar al acero. Mayor durabilidad. Mayor ductilidad. Resistencia pasiva al fuego con dosificación de 1Kg/m^3 . Todas las demás propiedades aportadas al hormigón con la utilización de las macrofibras sintéticas de polipropileno.

El campo de utilización de este tipo de fibra es el mismo que el indicado para las macrofibras sintéticas de polipropileno.

Fibras micro-sintéticas (pp)

Son fibras más cortas (entre 6 mm y 64 mm); el diámetro de la fibra también es menor que el de las macrosintéticas (34-56 micras). Esta fibra tiene un módulo de elasticidad Young y una resistencia a tracción menor que la fibra macro-sintética. Las fibras de polipropileno se fabrican con las variedades de monofilamentos y multifilamentos.

Hay diferentes tipos de fibras micro-sintéticas: fibras de resistencia pasiva al fuego y fibras contra la microfisuración.



Ilustración 36 Fibras de resistencia pasiva al fuego

Proporcionan las siguientes ventajas: se reduce la segregación, incremento de la hidratación. Se reduce la micro-fisuración (retracción). Aumenta la resistencia a la abrasión y al impacto. Menos permeable. Se reduce la corrosión. Se incrementa su tenacidad. Se mejora su acabado superficial. Mayor durabilidad. En la actualidad, ya se emplea en hormigones de revestimiento.

Fibras combinadas (híbridas)

Otro ejemplo de utilización de fibras lo proporciona la utilización de fibras de diferentes materiales, con módulos de elasticidad, tamaño y forma también diferentes, como las fibras de acero, polipropileno, vidrio y PVA como refuerzo del hormigón. La utilización conjunta de diferentes tipos de fibra, permite obtener hormigones de las características deseadas:

- a) Resistentes y poco flexibles utilizando fibras de carbono HM.
- b) Resistentes y flexibles utilizando fibras de Aramida, Basalto, Vidrio y metálicas.
- c) Menos resistentes y más flexibles utilizando fibras de PVA, macrofibras de polipropileno y olefinas

Nuevos hormigones

La utilización de nuevos hormigones en el sostenimiento y revestimiento de las obras subterráneas permitirá mejorar su seguridad y su durabilidad a la vez que propiciará una reducción de los plazos y de los costes de construcción y de explotación.

HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES (AUTO-NIVELANTES)

Los hormigones auto-compactantes o auto-nivelantes se vienen utilizando tradicionalmente, en la construcción de puentes y elementos prefabricados.

Varias son las ventajas que ofrece la utilización de este tipo de hormigones en el revestimiento de túneles; entre ellas destacan una mejor calidad, fiabilidad y durabilidad del hormigón con menores costes de colocación, ya que no necesita ser vibrado.

Sus principales propiedades son: autocompactación, autorrellenado sin necesidad de vibrado. Fluye con facilidad entre las armaduras. Alta resistencia a la segregación de los áridos. Garantía de llenado; ausencia de huecos y coqueras. Más denso y compacto. Mejor calidad del hormigón. Mayor durabilidad. Textura superficial uniforme. La adición de fibras, les confiere las propiedades específicas de éstas.

HORMIGONES CEMENTÍTICOS (ECC)

Desde el año 1993 se viene desarrollando y utilizando un nuevo tipo de hormigón, diseñado micromecánicamente y que tiene unas propiedades muy superiores a la de los morteros y hormigones de uso habitual. Es por tanto, un hormigón de tecnología avanzada.

Mediante el conocimiento de la microestructura de sus componentes y su control micromecánico, es posible fabricar hormigones con unas características determinadas.

Sus principales propiedades son: más ligero: (un 40% menos que un hormigón normal); 500 veces más resistente a la fisuración que un hormigón normal. Resistencias a compresión y tracción similares a la de los hormigones de alta resistencia, $\sigma_c > 50 \text{ MPa}$. Comportamiento deformación-tensión (strain-hardening). Tenacidad elevada. Muy dúctil (3% - 7%). Propiedades isotrópicas; no presenta planos débiles. Durante la fase de deformación se forman microfisuras menores de 60mm que no afectan a la permeabilidad del hormigón.

Alta durabilidad y más económico a largo plazo. Más impermeable. Químicamente estable resistente a la corrosión.

HORMIGONES POLIMÉRICOS

Los hormigones poliméricos son aquellos en los que se sustituye, parcial o totalmente, el cemento Pórtland por un polímero. Los hormigones poliméricos con sustitución total del cemento Pórtland por un polímero, se utilizan en prefabricados de hormigón. Estos hormigones tienen un fraguado muy rápido son muy dúctiles y tienen una gran durabilidad.

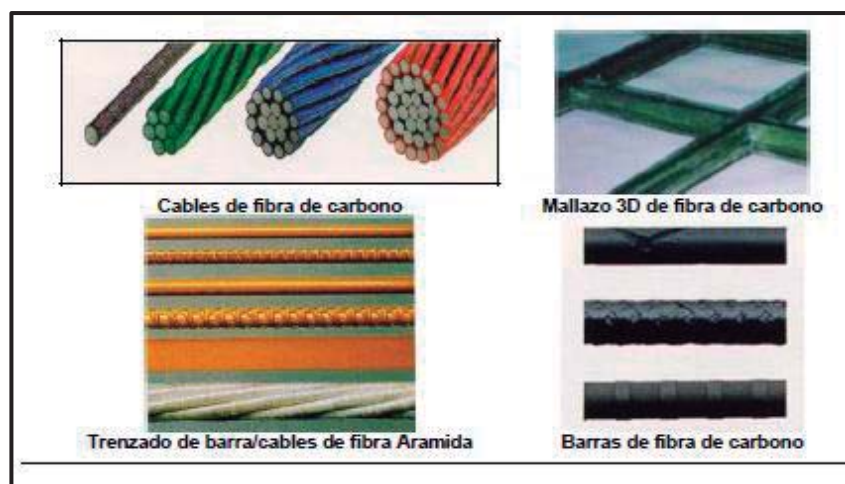
Sus principales propiedades son: dependen del tipo de polímero y de la cantidad utilizada, fraguado muy rápido, impermeable, mayor durabilidad, resistente a la corrosión, a los ataques químicos, a los álcalis, al sulfato sódico y al ácido clorhídrico, resistente al ciclo hielo-deshielo, muy dúctil, menor retracción. Buena adherencia a las armaduras y a los hormigones antiguos. Mejores características resistentes: a tracción y a flexión. Sensible a las altas temperaturas (se utilizan inhibidores).

Nuevos materiales sintéticos de aplicación

La utilización de materiales sintéticos en Obras Subterráneas como refuerzo de hormigones, así como de polímeros proyectados en forma líquida, tienen un futuro muy prometedor por las ventajas que se derivan de su utilización: menor peso, menor coste, más fáciles de transportar, de colocación más rápida y muy resistentes a la corrosión, a los álcalis, a los ácidos y a los productos químicos en general.

MATERIALES FABRICADOS CON FIBRAS SINTÉTICAS CONTINUAS

Este tipo de materiales NEFMAC (New Fiber composite material for reinforcing concrete), está fabricado con fibras sintéticas continuas de vidrio, carbono, aramida, basalto y otras. Utilizadas solas o combinadas entre sí impregnadas con una resina apropiada.



Sus propiedades son: más ligeros (densidad < 2), buenas propiedades estructurales, resistentes a la corrosión, a los álcalis, a los ácidos y a los productos químicos. Facilidad de colocación, buena adaptabilidad a las irregularidades del terreno, no magnético. Su campo de

utilización se extiende a reparación y refuerzo de hormigones, mallazos anclajes. Bulones cortables. En estabilización de taludes.

POLÍMEROS PROYECTADOS

Diversas investigaciones encaminadas a obtener un sistema rápido y eficaz para el refuerzo y el revestimiento de galerías y túneles, han dado como resultado dos materiales, el Mineguard TM y el Rockguard TM.

Se trata de un nuevo método de refuerzo del terreno con membranas poliméricas producidas in situ, por la proyección de dos componentes líquidos (bicomponentes) polímeros que se endurecen muy rápidamente formando una membrana dura y resistente.

Este nuevo método de refuerzo abre grandes expectativas de aplicación en sostenimientos y revestimientos de las obras subterráneas por su rapidez de colocación y por la importante reducción que puede suponer de los espesores en los materiales de refuerzo y por la mayor seguridad que aportan. Su utiliza en sostenimientos y revestimientos con espesores muy pequeños (de 2 mm a 20mm), de rápida y económica colocación. En reparaciones y refuerzos de sostenimientos y revestimientos deteriorados. Otras ventajas de su utilización son: menores tiempos de colocación, mejor estabilidad y seguridad en la zona de trabajo. Menores costes de ejecución. Gran economía de materiales de refuerzo. Reducción importante de las secciones de excavación con la consiguiente reducción de los costes de construcción.

NANOMATERIALES (NANOCOMPUESTOS)

En los próximos años, en el horizonte de 2020, de la mano de la Nanotecnología, se podrán sustituir las actuales fibras para refuerzo de hormigones, por partículas de tamaño inferior a una micra (10-6 m) e incluso de tamaño molecular.

Las propiedades de los materiales reforzados con estas nanofibras serán muy superiores en resistencia mecánica y en resistencia al deterioro que los actualmente utilizados y tendrán un menor peso. La manipulación de los átomos, uno a uno, cambiándolos de posición o sustituyéndolos por otros, permitirá fabricar compuestos moleculares, nanocompuestos, de propiedades prefijadas y desconocidas hasta ahora. Uno de los componentes principales de los nanomateriales, serán los nanotubos de carbono puro, 10.000 veces más delgados que un cabello, que posee unas propiedades formidables: Módulo de Elasticidad de Young 6 veces

superior al del acero, resistencia a la tracción 10 veces superior a las fibras más resistentes actualmente conocidas con una rigidez similar.

Se fabricarán nuevos cementos con unas propiedades muy superiores a las de los actualmente conocidos.

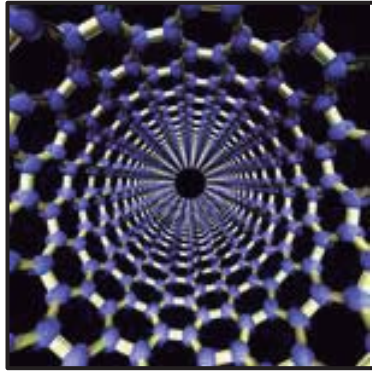


Ilustración 37 Nanotubo de carbono puro

La Nanotecnología propiciará también la producción masiva de estos materiales con menores costes de fabricación, de transporte y distribución, en definitiva más baratos. La utilización de los nanomateriales reducirá también el consumo energético.

4 INSPECCIÓN DE TÚNELES

En los últimos tiempos, los instrumentos topográficos se han adaptado a sistemas más eficaces que permitirían una mayor productividad si se usaran de forma combinada.

Los vehículos aéreos no tripulados, los LIDAR móvil y scanner láser portátiles aportarían en estos procedimientos de forma eficaz en comparación con la metodología tradicional una inspección óptima.

La topografía es transversal en la obra subterránea: está presente tanto en la exploración como en la explotación y, por supuesto, también en la construcción del proyecto. Esta disciplina es fundamental.

Los instrumentos topográficos, por su parte, registran avances que permiten realizar esta labor con mayor eficiencia. Así, desde hace algún tiempo, el concepto de productividad se instaló en las mediciones topográficas, de modo que los equipos actualmente incorporan tecnología que permite hacer un levantamiento de datos más rápido con precisión y un procesamiento de datos incluso inmediato.

En resumen, lo que se espera con esta propuesta que comentaré es una mayor productividad, reduciendo costes y garantizando la seguridad en todo momento como reducir el tiempo de inspección. Ósea, se trata de conocer el estado actual de los túneles, detectar fallos o estados deficientes”, de manera que se pueda mejorar la seguridad en este tipo de infraestructuras e incrementar la vida útil, “reduciendo también los costes económicos, ya que al hacer un mantenimiento preventivo se pueden corregir los defectos antes de que se extiendan y se encarezca el proceso de reparación.

Partimos de la base de que los túneles son unidades de obra complejas en las que interaccionan terreno y estructura, y por lo tanto, son obras sometidas a muchas variables (presencia de agua, discontinuidades en el terreno del trasdós, adecuada ejecución del revestimiento del túnel: anillos, pantallas, gunitado, etc.).

Para garantizar la seguridad del tráfico, maximizar la vida útil del túnel, etc. se hace necesario un seguimiento de su comportamiento y un mantenimiento adecuado. Este control se centra en el estado de su revestimiento, y consiste en la identificación de daños y/o defectos

que pueden dar lugar a zonas de inestabilidad, resultando el desprendimiento de fragmentos y bloques, u otro tipo de incidencias que pongan en peligro su utilización.

El objetivo de este apartado es combinar y desarrollar una nueva técnica no destructivas para la supervisión e inspección de túneles solventando y/o minimizando los problemas existentes.

La técnica no destructiva que se va a estudiar es la combinación de la **reflectancia** y el estudio de la **emisividad**. Se han elegido estas técnicas dada su viabilidad técnica, su coste razonable y la experiencia en su aplicación. El dron lo presentaré como método de inspección de innovación usando esta tecnica novedosa que he propuesto y se comparará con otra tipo de plataforma móvil como es el mapeo móvil y con el estático escaner-laser.

Pese a que no se está utilizando en túneles, creo que podría ser un gran avance en cuanto a la auscultación, detección de grietas, humedades, carbonataciones etc tanto para inspección subterránea como para la inspección de viaductos, puentes... se gana en coste, calidad, tiempo y proporciona en particular el dron una alta seguridad de inspección.

4.1 COMBINACIÓN DE TÉCNICAS PRECISAS, TERMOGRAFÍA Y REFLECTANCIA EN DIFERENTES PLATAFORMAS

4.1.1 CONCEPTOS GENERALES

La automatización del proceso de inspección se realizará gracias a la combinación de dos técnicas no destructivas: la termografía (que mide la temperatura de una superficie a distancia mediante radiación infrarroja) y la reflectancia (que estima la capacidad de las superficies de reflejar la luz).

Actualmente las inspecciones periódicas que se realizan en túneles se hacen de forma manual, un técnico camina por la infraestructura realizando una inspección visual para detectar si existen fallos o incidencias en la superficie y a su vez puede escanear la superficie.

Para lograr automatizar este proceso, se puede combinar e implementar dos técnicas no destructivas: la termografía (que mide la temperatura de una superficie a distancia mediante radiación infrarroja) y la reflectancia (que estima la capacidad de las superficies de reflejar la

luz). Ninguna de las dos técnicas es novedosa en sí misma, pero su combinación para solucionar el problema de la inspección de túneles sí lo es.

El primer paso en este sentido, será definir hasta qué punto se puede resolver con estas tecnologías, de forma individual y conjunta, la problemática de la revisión de los túneles.

Como punto de partida se definirá el umbral de resolución que pueden aportar de forma individual cada uno de los dos métodos y conjunta, para posteriormente implementar estas dos tecnologías en un mismo dispositivo.

Puntos georeferenciados

La información que se recoja estará georreferenciada, es decir, se conocerán las coordenadas exactas donde se han localizado las incidencias. Es evidente de que esto supone una importante ventaja ya que “en una próxima inspección se puede saber en qué punto exacto se ha hallado un defecto, por ejemplo una pequeña grieta o una humedad. Se podrá observar su evolución, de forma que será fácil su detección y su consecuente intervención antes de que se produzca un problema mayor.

Un ejemplo de tecnología es el uso de escaner- laser, el dron con dos cámaras, una visual y otra termográfica, y el mapeo móvil. Para entender dicha tecnología se definiran los siguientes parámetros.

Una **nube de puntos**, es una representación discreta de una realidad continua, si bien a diferencia de los métodos topográficos / fotogramétricos convencionales, la toma de los puntos se hace de manera indiscriminada. Esta particularidad conlleva una serie de dificultades a la hora de gestionar y manejar la información.

La obtención de nubes de puntos se puede llevar a cabo mediante dos tecnologías claramente diferenciadas: basadas en LIDAR o basadas en FOTOGRAMETRÍA.

Asimismo, los dispositivos de adquisición de datos, pueden posicionarse sobre un simple trípode o pértiga (escáner estático), o bien estar embarcados en un vehículo (DRON, coche...) En el caso que el equipo vaya montado sobre algún tipo de vehículo, será necesario dotar al sistema con sistemas de posicionamiento y de registro inercial.

En cualquier caso, el uso de las tecnologías de captura masiva de datos, aportan una serie de ventajas frente a los sistemas tradicionales:

- Fiabilidad
- Precisión
- Rapidez
- Accesibilidad

LIDAR (Light Detection And Rancing)

Esta tecnología permite determinar la intensidad y la distancia a un objeto o superficie usando pulsos láser. Esta tecnología permite capturar de manera discreta pero a muy alta resolución cualquier elemento en tres dimensiones (3D), de modo que pueda ser analizado digitalmente en un entorno CAD, SIG o BD

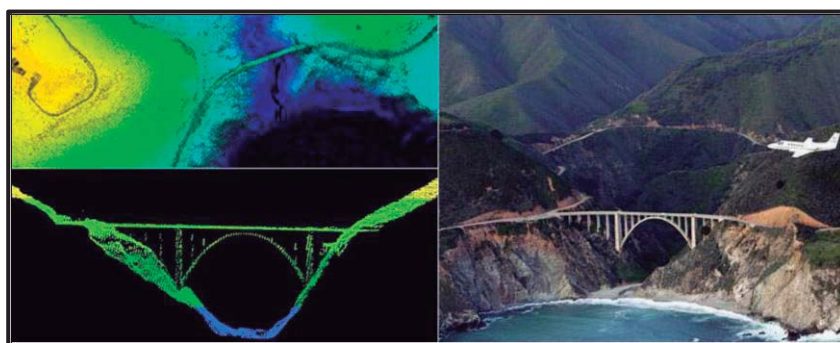


Ilustración 38 Comparación de una fotografía normal vs escaner con LIDAR

Los sistemas LIDAR, acostumbran a incorporar también algún tipo de cámara fotográfica, siendo capaces de generar también imágenes georreferenciadas.

Las principales características comunes a las tecnologías LIDAR son las siguientes:

1. Medición mediante pulsos láser. Utiliza como método de medición una fuente de energía generada por el propio equipo, lo convierte en un sensor activo. Esta característica marca una diferencia sustancial con la fotogrametría, que, como sensor pasivo, registra la radiación reflejada en el sensor de la cámara, por lo que las condiciones de iluminación afectan a los resultados.
2. Coherencia del haz. La ventaja que tienen estos pulsos láser es el pequeño grado de divergencia del haz (el haz de luz láser coherente ideal no tendría divergencia) con lo

que puede localizarse el reflejo del haz en los objetos durante el proceso de barrido: esto nos proporciona información sobre la intensidad de la señal del objeto escaneado.

3. Medición a distancia. A diferencia de otro tipo de sensores de contacto, estos escáneres no precisan del contacto físico con el objeto a medir, con lo que será cómodo para trabajar sobre superficies delicadas, zonas inaccesibles o peligrosas.

FOTOGRAMETRÍA

Es una técnica para determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas georreferenciadas. Dicho de otra manera: es la técnica que nos permite "medir sobre fotos". Si trabajamos con dos fotos, en la zona común a éstas (zona de solape), podremos tener visión estereoscópica; o dicho de otro modo, información tridimensional. Identificando en dos fotogramas consecutivos un objeto, el sistema calcula mediante triangulación la posición a partir de las coordenadas conocidas de la cámara.

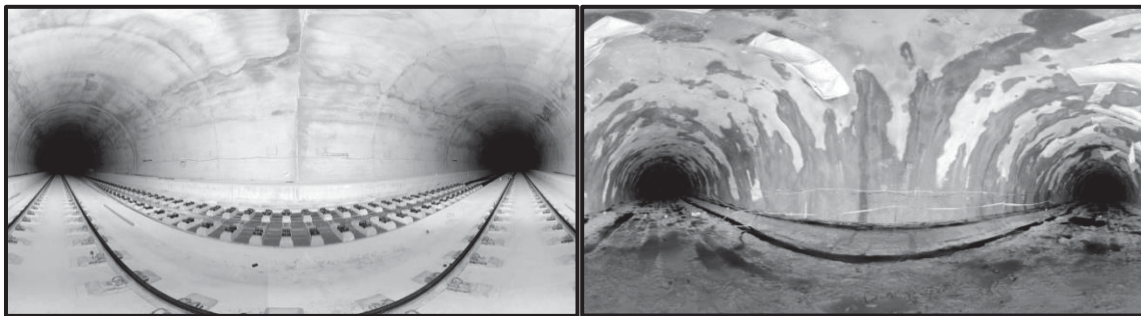


Ilustración 39 Ejemplo de túnel visto con fotogrametría, distinguiendo las zonas de humedad

Los sistemas basados en fotogrametría permiten digitalizar puntos, líneas y polígonos en 3D directamente sobre la imagen con precisión milimétrica y realizar mediciones de cualquier objeto visible en la imagen.

Este tipo de sistema tienen una clara ventaja competitiva, el tamaño de la información generada es mucho menor que los sistemas basados en LIDAR, lo que permite aumentar la recurrencia del levantamiento. Otra ventaja es que cuentan con un precio de adquisición más competitivo. Actualmente es posible generar nubes de puntos a partir de imágenes.

4.1.2 TIPOS DE MEDICIONES

Medición basada en triangulación

El principio de medición está basado en el cálculo del triángulo formado por los componentes internos del escáner y el elemento a medir

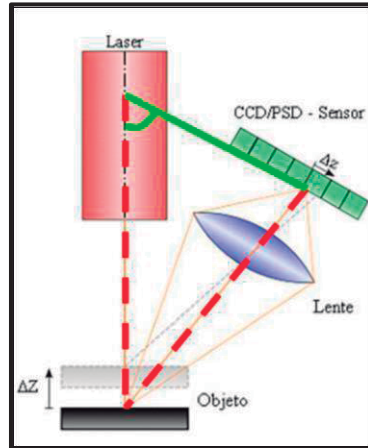


Ilustración 40 Esquema medición basada en triangulación de: Leica Geosystems

Las características de los escáneres láser basados en el principio de la triangulación son:

- Alta precisión, en torno a la décima o centésima de milímetro.
- Distancia equipo láser-objeto máxima de un par de metros. La distancia máxima está condicionada por el ángulo de intersección en función de la base láser-sensor (cámara)..
- Frecuencia elevada (en torno a 100 MHz o incluso superior).

Este tipo de equipos, se emplea generalmente para el escaneado de piezas y matrices en industria de automoción donde las tolerancias son muy pequeñas.

Medición basada en pulsos

Este método determina el cálculo de la distancia en función del tiempo transcurrido en recorrer el haz de luz láser el doble de la distancia entre el emisor y el objeto. El equipo de escáner láser cuenta con un sistema de espejos rotatorios y servomotores que direccionan la trayectoria del haz tanto en el plano vertical como en el horizontal.

Las características de los escáneres láser basados en el tiempo de vuelo son:

- Frecuencia comprendida entre 2-100 MHz.
- Precisiones que oscilan entre los 4-30 mm.
- Largo alcance: desde los centenares de metros hasta kilómetros.

Medición basada en la medida de fase

El haz de luz láser se propaga según ondas sinusoidales, siendo la longitud de dichas ondas conocida. La distancia a medir se calcula en función del número entero de longitudes de onda y el desfase entre la onda emitida y la reflejada en el objeto.

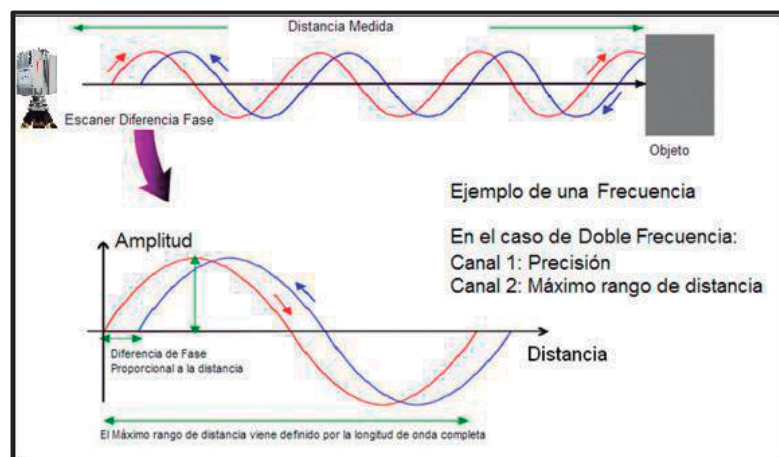


Ilustración 41 Esquema funcionamiento medida de fase de Leica Geosystems

Las características de los escáneres láser de diferencia de fase son:

- Alcance intermedio: normalmente inferior a un centenar de metros.
- Muy alta frecuencia: 1000 MHz o incluso superior.
- Precisiones en torno a 2-10 mm

4.1.3 ERRORES

A la hora de trabajar con un equipo láser escáner, es importante conocer conceptos como la precisión, la exactitud o el alcance del equipo, entre otros.

- Precisión

Es la capacidad de un instrumento de ofrecer el mismo resultado de medición en condiciones similares. Hace referencia a la dispersión del conjunto de valores medidos con respecto a la media.

- Exactitud

Es la capacidad de un instrumento ofrecer un valor de medición próximo al valor real. El valor real teóricamente es desconocido. Suele asignarse a valores que provienen de equipo de mayor calidad.

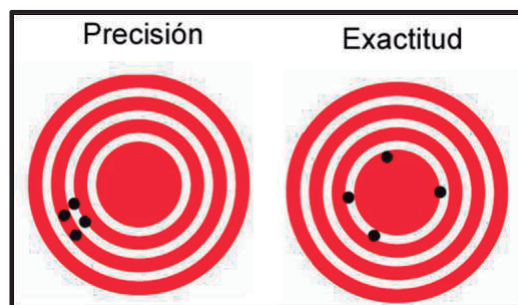


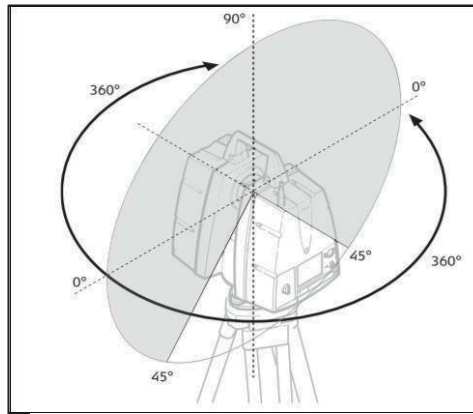
Ilustración 42 Precisión vs. Exactitud

- Alcance

Es la distancia máxima a la que puede medir el equipo. Esta distancia viene dada por el tipo de sensor láser (tal y como hemos visto anteriormente), pero también por las características del objeto a escanear. Así pues, los objetos más claros ofrecen mayores alcances. También la disposición del haz láser en relación con el objeto es relevante, ya que cuanto más perpendicularmente incide el haz, mayor alcance y mejores precisiones se obtienen.

- Campo de escaneado

Marca la porción del espacio que el sistema es capaz de medir sin necesidad de realizar barridos adicionales. En función de este parámetro podrá afrontarse con mayor o menor agilidad la ejecución de trabajos en diferentes escenarios. A continuación se muestra el campo de visión de un escáner panorámico. Disponer de un campo de visión como el reseñado se estima crítico en trabajos de interiores o en zonas con grandes variaciones de distancia en los tres ejes.



Il·lustració 43 Recorrido del escaner-láser

En la gran mayoría de los equipos, es posible establecer una zona de escaneo, a partir de un ámbito horizontal y vertical.



Il·lustració 44 Zona de escaneo a partir del área horizontal y área vertical

- Tamaño del haz láser

El tamaño del haz de luz láser se mide a través de su diámetro. Este parámetro, combinado con el grado de dispersión del mismo, determina la capacidad de discriminar detalles conforme estos valores sean más pequeños.

Explicado en que consiste el escaner- láser y sus diferentes métodos como los parámetros que se deben controlar, lo enfocaré a la la rama de la ingeniería civil, en concreto lo relacionaré con la inspección de obra subterránea.

4.1.4 LEVANTAMIENTO SUBTERRÁNEO

Se sabe que una de las principales aplicaciones del láser escáner en trabajos subterráneos, es en túneles. Tradicionalmente, en los trabajos en túnel, la información se capturaba de forma

discreta, tomando perfiles cada N metros. Con la llegada del láser escáner, el levantamiento es prácticamente continuo y se generan perfiles a demanda una vez en la oficina. Adicionalmente es posible añadir sensores al láser escáner, tales como cámaras de infrarrojos, sensor térmico, etc. pudiendo incorporar información relativa a patologías, humedades, etc. al modelo.



Ilustración 45 Nube de puntos de túnel de GeoInformatics

El escaneado se puede llevar a cabo mediante sucesivos estacionamientos hasta cubrir la totalidad de la longitud del túnel, o bien embarcado en un carro de vía o en un tren. En este segundo caso, el láser escáner se configura como un perfilómetro (se anula el movimiento rotatorio horizontal) y el equipo se orienta en el sentido transversal al avance. Además es necesario instalar un sistema inercial y de posicionamiento, así como un software de campo capaz de sincronizar los perfiles con las posiciones. Este sistema permite rendimientos muy elevados, sin embargo tiene un elevado coste.

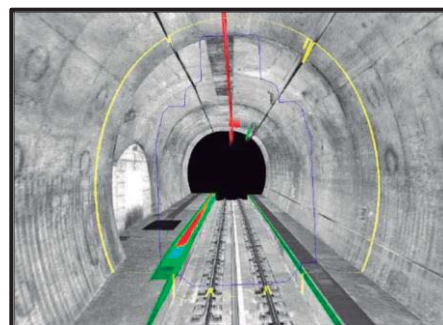


Ilustración 46 Estacionamiento del escaner-laser en la boca de un túnel ferroviario

Los productos que podemos obtener como resultado del escaneado de túneles son:

- Inventario de túnel: el láser-escáner no sólo obtiene una nube de puntos, sino su representación 2D en forma de imagen panorámica de 360º, en base a los valores de intensidad de la señal.
- Análisis de interferencias: en combinación con la definición del trazado (eje en planta y sección tipo) es posible identificar interferencias o deficiencias en la ejecución del túnel.
- Análisis estructural (deformaciones)
- Patologías
- Documentación “as built”

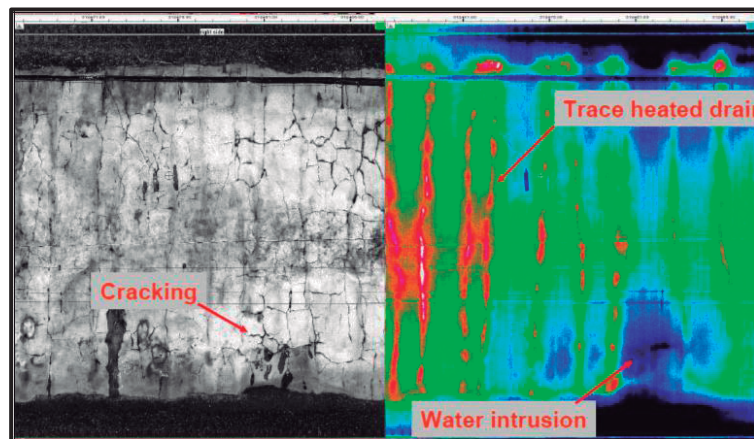


Ilustración 47 Imagen plana y termal de un túnel

4.1.2 GENERACIÓN DE UNA NUBE DE PUNTOS

El escaneado de una obra subterránea es una tarea que requiere de un buen conocimiento de las características del equipo, de los procesos de registro limpieza, etc. que suceden a la toma de datos en campo para que el trabajo sea un éxito. Algunos de los procesos son relativamente sencillos, pero otros entrañan cierta complejidad.

Planificación

Es fundamental conocer de antemano algunos aspectos del trabajo a realizar, tales como:

- Finalidad del trabajo

He explicado los diferentes análisis que podemos obtener con el láser escáner; desde un nube de puntos, hasta un modelo 3D, curvas de nivel, secciones, modelos de deformación etc. Cada uno de estos productos requiere de un arduo trabajo de oficina y de campo que debe ser considerado cuidadosamente.

Una razón de peso para emplear un láser escáner, puede ser la incertidumbre que nos ocasionan las obras subterráneas pues la información registrada es abundante y precisa.

- Extensión y detalle de la zona a escanear

Antes de abordar el trabajo, debemos conocer cuál es el detalle mínimo que debe quedar registrado en la nube de puntos. No es lo mismo que el nivel de detalle alcance hasta un grieta, que definir simplemente distribuciones de las deformaciones...

Por último, las medidas de prevención habituales, también aplican a los trabajos de láser escáner: señalización de la zona de trabajo, uso de EPI's, etc.

- Estacionamientos y dianas

La posición del escáner con relación al objeto a escanear es importante, tal y como se ha visto anteriormente, ya que cuanto más perpendicular se encuentre el haz láser a la superficie, mejores resultados obtendremos en cuanto a precisión y alcance.

Por último, debemos vigilar que nuestro equipo tiene suficiente alcance para la distancia a la que se va a trabajar. En el caso de que no lo tuviera, se harían más estacionamientos.

Organización

El escaneado de cualquier objeto, infraestructura, etc. implica la creación de numerosos y voluminosos archivos, tanto de nubes de puntos como de fotografías, datos topográficos, croquis, etc. Además los trabajos estarán ubicados en alguna zona remota o de difícil acceso, por lo que hay que prever todo lo necesario.

No menos importante, y muchas veces olvidado, es disponer de uno (o varios) soportes de almacenamiento (tarjeta SD, USB, etc.) de calidad y con suficiente capacidad. Confiar todo nuestro trabajo a una memoria de baja calidad no es para nada conveniente.

Toma de datos

Antes de empezar a tomar datos, debemos saber qué método de registro vamos a utilizar: intersección inversa, estacionamiento en punto conocido o comparación de nubes.

El estacionamiento de un escáner es similar al de una estación total, si bien dependiendo del equipo, esta operación se simplifica notablemente si éste está dotado de compensador de inclinación, brújula, altímetro o GPS integrados. A continuación, debemos ajustar los parámetros del escáner relativos a:

1. Directorio de trabajo: se crea una carpeta donde se localizan todos los archivos del trabajo (nubes de puntos, fotografías, datos de sensores, etc.)
2. Nombre de los archivos: nombre que se asigna a los escaneados, incremento automático de los nombres, etc.
3. Operador
4. Ubicación
5. Resolución: determina el número de puntos a tomar a una determinada distancia. Realmente, el valor de resolución, hace referencia a la resolución angular. Así pues, si establecemos 5 mm a una distancia de 10 metros, esto serán 10 mm a una distancia de 20 metros.
6. Calidad: establece la potencia y el número de reiteraciones a la hora de medir las distancias a los puntos. A mayor calidad, mayor tiempo de escaneado. También obtendremos menos dispersión en los puntos medidos.
7. Zona a escanear: se define visualmente, a partir de un escaneado previo a baja resolución o, gracias a la imagen que nos muestra por pantalla en tiempo real.
8. Operador
9. Configuración general: unidades, hora/fecha, sensores, etc.

Una vez definidos todos los parámetros, el proceso de toma de datos se hace de manera automática. Dependiendo del equipo, puede ser necesario hacer el escaneado preciso de dianas antes o después del escaneado.

Si se va a realizar la georreferenciación de las nubes de puntos, será necesario llevar a cabo trabajos topográficos adicionales para dar coordenadas a las dianas. En ocasiones, es recomendable llevar a cabo pequeños levantamientos de las aristas o líneas características.

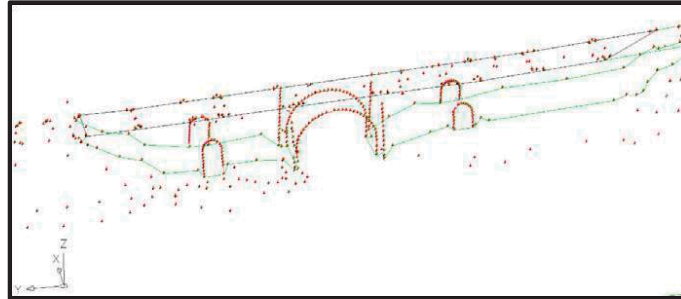


Ilustración 48 Nube de puntos en 3D

Registro

El escaneado de un objeto, edificio, etc. siempre requiere de más de un escaneado para cubrir la totalidad del mismo sin que queden zonas en sombra.

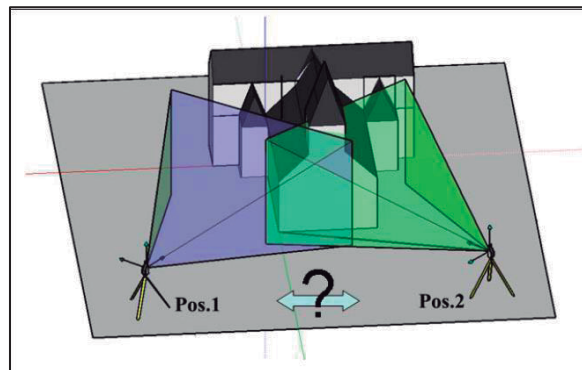


Ilustración 49 Solapamiento de escaneado de las zonas con poca angular

El proceso de registro, consiste en restablecer la posición relativa de los diferentes escaneados en el momento de la toma de datos. Esta operación es necesaria porque cada uno de los escaneados tiene definido el origen de su sistema de coordenadas en el centro óptico del propio equipo.

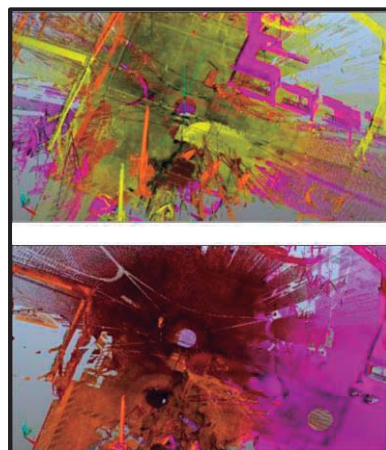


Ilustración 50 Nubes de puntos sin registrar (arriba) y registrada (abajo)

El proceso de registro se puede llevar a cabo según diversas técnicas, que se resumen en el siguiente esquema:

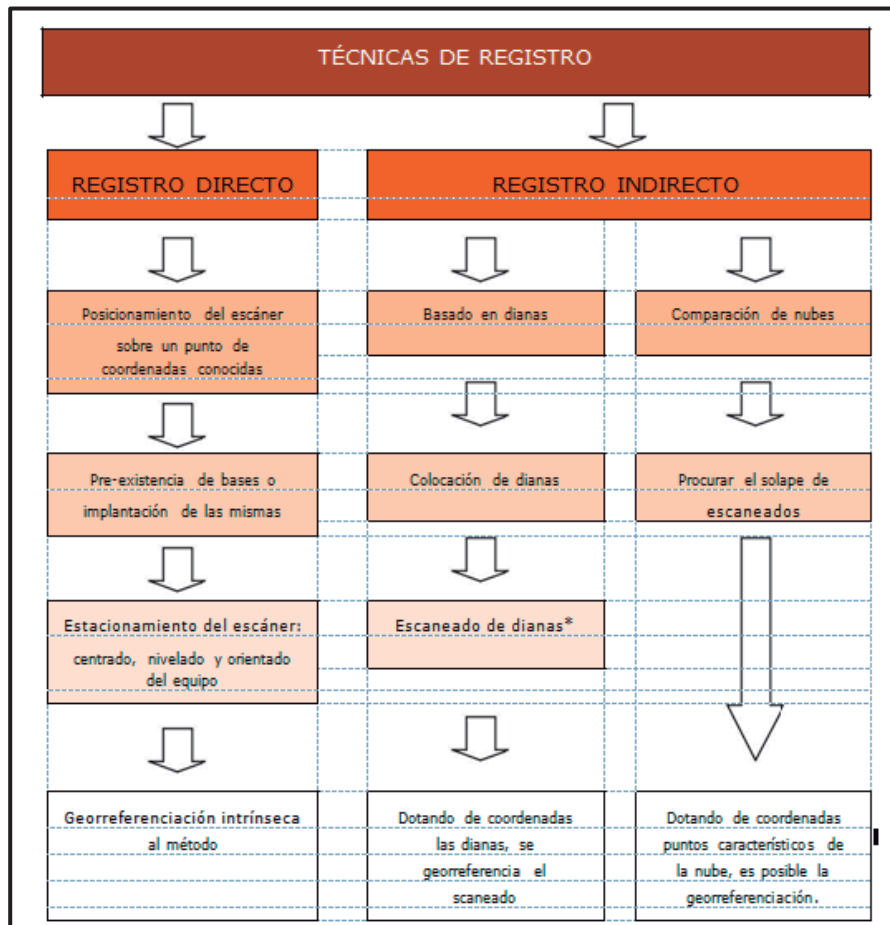


Ilustración 51 Esquema de técnicas de registro

- Registro directo

Este tipo de registro requiere de al menos dos puntos de coordenadas conocidas: el punto donde se va a estacionar el escáner y otro punto adicional, que permitirá establecer la dirección del sistema de coordenadas (del mismo modo que se hace con una estación total topográfica).

El registro directo, presenta la ventaja que no es necesario el solape entre las nube de puntos. Este método es prácticamente imprescindible cuando escaneamos un edificio por el exterior y por el interior, ya que es casi imposible tener solape suficiente entre los escaneados. La forma de dotar de coordenadas a los puntos, puede ser mediante estación total o GPS.

- Registro indirecto mediante dianas

Las dianas pueden ser naturales o artificiales. Las dianas artificiales presentan la ventaja que suelen ser reconocidas de forma automática por las aplicaciones de procesamiento de nubes de puntos, están diseñadas para que el proceso de observación mediante técnicas topográficas sea fácil (buena identificación del centro de la diana, diámetro de la esfera conocido, etc.). En general se usaran dianas artificiales en aquellos casos donde no sea fácilmente identificable una esquina, plano bien definido, etc. o en aquellos casos en los que, habiendo numerosos elementos susceptibles de ser usados como dianas naturales, se den patrones repetitivos.

Las dianas naturales, pueden ser cualquier objeto (tubo, farola, etc.) o arista (esquina, cornisa, etc.). También es posible identificar puntos como dianas, si bien es un poco arriesgado el uso de puntos como dianas, ya que la divergencia del haz láser introduce errores que pueden no ser asumibles.

Una vez identificadas las dianas comunes en escaneados contiguos, es posible llevar a cabo el registro basado en dianas. El software va a realizar una correspondencia entre las nubes en base a la correlación de las dianas.

- Registro indirecto por comparación de nubes

El registro por comparación de nubes, consiste en un proceso iterativo que compara toda una nube de puntos con otra. Este proceso iterativo va ajustando las nubes de puntos entre sí, estableciendo correlaciones entre ellas, hasta que no se pueden mejorar los valores. Entonces el software nos ofrece información sobre la calidad del ajuste.

Para poder llevar a cabo el registro por comparación de nubes, es necesario que las nubes tengan solape, para que los procesos de iteración sean efectivos.

Dependiendo del escáner y del software utilizado, este proceso puede requerir un registro "grosero" previo, para que el proceso de iteración sea exitoso. Los últimos equipos de láser escáner, al ir dotados de sensores como GPS, altímetro, brújula, etc. pueden simplificar (incluso eliminar) la necesidad de este registro "grosero".

Limpieza y depuración

La nube de puntos obtenida contiene ruido procedente de muy diversos orígenes: vegetación, vehículos o personas en medio de la escena, lluvia, polvo, las propias dianas, etc. Todo este ruido es necesario que se elimine si no queremos obtener resultados no deseados.

La primera operación de limpieza, consistirá en identificar estos ruidos y eliminarlos. También es frecuente que el escáner haya capturado datos más allá del ámbito de nuestro trabajo, por lo que eliminaremos las zonas ajenas a nuestro ámbito.

Hay otros ruidos que se pueden eliminar de una forma semi-automatizada, si bien hay que ser prudentes a la hora de utilizar procesos automáticos, ya que podemos obtener resultados no deseados. Estos algoritmos varían de unos fabricantes a otros, pero podemos señalar algunos comunes a todos como:

- Muestreo

Supone una simplificación de la nube de puntos, que la prepara para una futura triangulación de los mismos para formar una malla.

Muestreo espacial: es casi indispensable realzarlo si se pretende generar una malla. En el proceso de toma de la nube de puntos, nos encontramos zonas donde se da una alta concentración de puntos, junto con zonas donde hay poca información. Este muestreo espacial, homogeneiza la densidad de puntos en base al parámetro de distancia que establezcamos. Normalmente como resultado de este algoritmo se produce una ligera reducción del tamaño de la nube de puntos.

Muestreo por intensidad: es muy útil para eliminar aquellos puntos cuyos valores de intensidad del haz láser son muy altos o muy bajos, Como ocurre con los objetos muy oscuros o brillante.

Todas las operaciones de muestreo se llevan a cabo para reducir el volumen de información de la nube de puntos, sin perder calidad de la información y así obtener un modelo mallado óptimo.

- Creación de geometrías

El escaneado de objetos, infraestructuras, etc. tiene como finalidad la obtención de algún tipo de producto, ya sea una nube de puntos, un modelo, una ortofotografía, etc. Este es un

proceso que consume mucho tiempo y que en muchos casos, requiere de un proceso manual y poco automatizado.

Edición 2D

Es posible obtener información de manera bastante rápida y sencilla de la nube de puntos ya depurada. Lo más habitual es la obtención de perfiles o secciones. Al tratarse de nubes de puntos, estos perfiles son más bien “lonchas” con un espesor definido por el usuario. Estos perfiles se pueden exportar a un programa de CAD y trabajar sobre ellos.

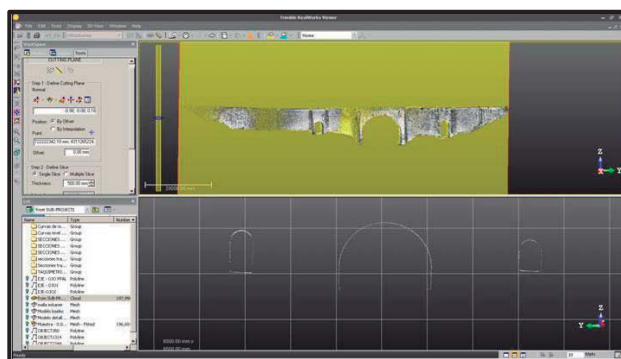


Ilustración 52 . Sección de un puente sobre la nube de puntos

Edición 3D

Se distinguen aquí el modelado de elementos regulares de los orgánicos. Tendremos elementos regulares en el caso de modelado de túneles. En este caso, el modelado es bastante más sencillo, ya que las aplicaciones de gestión de nubes de puntos incorporan algoritmos de reconocimiento de geometrías: líneas, planos, esferas, cilindros, etc. Actualmente ya es posible cargar librerías normalizadas de perfiles y que el propio programa modele el perfil normalizado que más se ajusta o también establecer el recorrido de una canaleta para el drenaje con sus codos y empalmes.

La problemática la encontraremos en elementos orgánicos, es decir aquellos que no responden a ninguna primitiva geométrica. Es el caso de la arquitectura singular, esculturas, utillaje, minas, etc.

Producto final



Ilustración 53 Fotografía

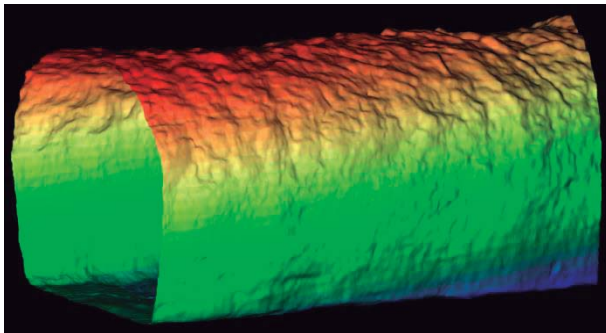


Ilustración 54 Escaneado en 3D

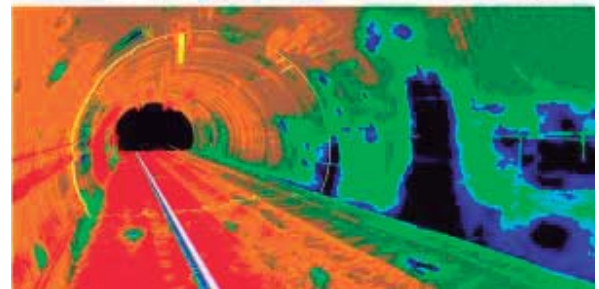


Ilustración 55 Escaneado escala grises y color

4.2 COMPARATIVA DE LOS DIFERENTES MÉTODOS

Después de haber explicado esta novedosa combinación, expondré dos líneas que apuntan a cambiar los procedimientos tradicionales:

- Datos geoespaciales de manera masiva. Respecto a los métodos tradicionales aportan a una mayor productividad, seguridad y son igual de precisos.
- Los LIDAR móvil, un escáner láser con el cual se obtiene una nube de puntos del terreno **montado en un vehículo**.

Mientras que los UAS contemplan equipos de:

- Ala fija: útil cuando las extensiones de terreno son muy grandes
- Multirrotores: permiten hacer captura de datos geoespaciales en lugares más reducidos o también hacer fotogrametría oblicua (la cámara se inclina cuando el UAS cambia de curso). Se puede tomar un talud minero con mayor precisión o una estructura vertical desde puntos de vista que la fotogrametría vertical no permite. El resultado, finalmente mucho más acabado.

Hay otra clasificación en lo UAS en función del mismo sensor Sensor fotográfico (captura de imágenes).

- LIDAR (escáner láser) aerotransportado. También es un LIDAR móvil, pero con la diferencia de que está montado sobre un vehículo aéreo no tripulado. Esto es posible gracias a su diseño más liviano y transportable. El escáner, que tradicionalmente pesa cerca de 15 kg, se redujo a 4 kilogramos, y va montado en un multirroto con esa capacidad de carga.

En ambos casos, el producto final es una nube de puntos. En tanto, la diferencia radica en que las cámaras fotográficas son sensores pasivos (dependen de la luz para realizar una toma), mientras que el escáner láser es un sensor activo (produce su propia energía para hacer una captura). LIDAR, podría capturar los lugares con sombra sin ningún problema.

En cuanto a la evolución de los instrumentos topográficos, la estación total derivó en un escáner montado en trípode y actualmente se montó arriba de un vehículo. De este modo, el levantamiento se puede hacer en movimiento, por lo tanto el tiempo de adquisición de datos es mucho más rápido, señalan en Geocom.

Mobile-Mapping

Trimble MX2 es un ejemplo de Mobile-Mapping, un sistema de levantamiento móvil montado en un vehículo que combina, un escáner láser de alta resolución y un posicionamiento preciso para capturar nubes de puntos georreferenciadas. Reduce significativamente el tiempo de recolección de datos en terreno en comparación con las técnicas tradicionales. Asimismo, este equipo sería capaz de levantar hasta 72.000 puntos por segundo en su configuración de doble escáner.



Ilustración 56 Mobile Mapping System

El sistema tiene tres elementos principales: un sensor compacto, ligero y resistente, diseñado para ser montado en vehículos de distintos tamaños. Contiene uno o dos cabezales láser, un GNSS Trimble, y un módulo de georreferenciación inercial para un posicionamiento preciso.

El control del sistema y el registro de datos son proporcionados por un computador portátil equipado con el software de captura Trimble® Trident™. El operador podría configurar rápidamente los parámetros del sistema y gestionar el registro de datos gracias a una interfaz de usuario intuitiva.

En tanto, este sistema favorece la seguridad ya que no es necesario que los geomensores bajen del vehículo para hacer la medición.

Dron

Si bien la fotogrametría es una solución de menor costo que un levantamiento de datos topográficos con un escáner láser, requiere de mucho tiempo de procesamiento. Unas 800 fotografías –con un peso aproximado de 4 a 15 MB cada una– deberían tardar unas 6 a 10 horas en procesarse con un computador convencional.



Ilustración 57 RIEGL RiCOPTER

Sin embargo, existe un equipo cuyo procesamiento de datos sería casi instantáneo. Se trata del RiCOPTER de RIEGL, un UAS equipado con un equipo LIDAR el cual hace una captura e inmediatamente descarga la nube de puntos. Este sistema se apoya de un GPS y de un sensor inercial IMU (Inertial Measurement Unit). Sirve también para analizar relaves de una forma más eficiente y segura. Aparte de hacer un levantamiento superficial, se le incorpora un sensor batimétrico y con este se hace un levantamiento del fondo del relave, para así calcular distintos parámetros como el volumen de agua, área afectada..

Un drone o dron es un vehículo aéreo controlado remotamente sin necesidad de ser tripulado, o lo que es lo mismo un vehículo capaz de volar de forma autónoma sin la necesidad de ser pilotado físicamente en su interior por una persona. Al igual que otras tecnologías que utilizamos diariamente como el GPS, los hornos microondas o Internet el uso de drones aplicados en el campo civil ha sido posible gracias a los estudios y desarrollos llevados a cabo originalmente en el área militar.



Ilustración 58 Vuelo de dron en túnel

Sin lugar a dudas, los drones están implantándose cada vez más en diferentes áreas y sectores de la economía mundial, llegando a convertirse en pocos años en una tecnología que nos acompañara en nuestro día a día, al igual que estamos habituados a ver coches circular por nuestras carreteras y autopistas, en breve veremos drones sobrevolando nuestras cabezas.

Con el paso del tiempo, el abaratamiento de la tecnología de fabricación y con los avances dentro del área de la computación, los drones han saltado de un uso exclusivamente militar a un uso público tanto en empresas como en particulares. Actualmente existen múltiples aplicaciones en las que los drones desarrollan un papel clave en la realización de tareas peligrosas o penosas para las personas, así como en otras en las que su eficiencia y eficacia mejora considerablemente la realización de dicha actividad. Entre las múltiples aplicaciones y sectores en los que se están utilizando drones con éxito podemos citar:

Agricultura y ganadería - Los drones son utilizados para monitorizar, controlar y pastorear rebaños y ganados así como vigilar, fumigar y controlar las plagas y regadíos de los cultivos. La aplicación de los drones esta suponiendo una auténtica revolución en estos sectores al poder controlar en tiempo a real el estado de los cultivos y rebaños a unos precios significativamente inferiores comparados con los métodos tradicionales.

Tareas peligrosas - Gracias a esta tecnología, actualmente numerosas tareas peligrosas están siendo realizadas por drones controlados remotamente sin peligro alguno para las personas, tareas como la limpieza de residuos tóxicos en lugares contaminados por radiación, virus o productos químicos venenosos para el hombre. Por otro lado los drones están siendo utilizados como medio de exploración y recogida de datos en tormentas, huracanes y volcanes en erupción, así mismo son el medio ideal para el rastreo de fugas radiactivas o de productos químicos altamente contaminantes.

Vigilancia - El uso de los drones en tareas de vigilancia ha mejorado la seguridad y control de eventos multitudinarios como los mundiales o las olimpiadas, vigilancia de bosques para la detección y control de posibles incendios. Por otra parte numerosos gobiernos de todo el mundo están introduciendo estas tecnologías como los compañeros ideales de los agentes de policía y vigilantes.

Transporte - Una de las áreas en donde los drones han encontrado su sitio es el sector del transporte, gigantes empresariales de la talla de Amazon, Google o DHL están ultimando los últimos detalles para trabajar con drones como medio de envío de paquetes directamente a la dirección del destinatario, en breve veremos como miles de drones dejan nuestras compras efectuadas por Internet en la puerta de nuestra casa. El sector logístico espera una nueva revolución de la mano de los drones.

Ocio - Numerosas personas de todo el mundo han ensamblado una pequeña cámara a su dron y ha permitido filmar imágenes y videos de lugares con una perspectiva nunca vista antes. El cine ha utilizado estos pequeños robots voladores como medio de filmación.

Drones que permiten supervisar y monitorizar el estado de numerosas instalaciones como puentes, fábricas, monumentos, redes eléctricas... drones como medio para ampliar la cobertura de Internet en aquellas zonas del planeta en donde los satélites no alcanzan, drones que captan imágenes de alta resolución mejorando los detalles y actualización de los mapas cartográficos... drones destinados al transporte de medicamentos y material médico permitiendo salvar vidas en zonas de conflicto o áreas devastadas por catástrofes naturales. Estos y un sinfín de aplicaciones son posibles gracias al desarrollo de esta tecnología. En el mundo de la ingeniería civil también encontramos una amplia gama de aplicaciones que se explicaran a continuación utilizando el sistema BIM para la obtención de datos.



Ilustración 59 Dron con protección de fibra de carbono

Adquisición de Datos con tecnología RPAS con sistema BIM

La demanda de tecnología por los sectores de Mantenimiento, Explotación e Inspección es creciente. La gestión de Infraestructuras, entre otras aplicaciones, ha evolucionado mucho en los últimos años, consiguiendo un nivel de precisión y especialización importante. El control de Mantenimiento, por su parte, tiene que responder a normativas cada vez más rigurosas con respuestas rápidas en caso necesario. Resulta de gran utilidad disponer de datos a escala y tiempos convenientes, puesto que es necesario aunar precisión, resolución espacial y rapidez operativa. Como respuesta, en los sectores mencionados, mediante sensores embarcados en plataformas aéreas, han experimentado una enorme aceleración de sus aplicaciones en la última década.

El rápido desarrollo de los RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems), que en pocos años han pasado de curiosos prototipos a eficaces y versátiles plataformas, revoluciona las aplicaciones de los sensores remotos. La mayoría de las aplicaciones operativas de los *RPAS se han basado hasta ahora en cámaras fotográficas digitales encomenderas, pero un creciente número de búsquedas científicas demuestran el enorme potencial de introducir sensores más sofisticados en este tipo de plataformas debido de tanto a la miniaturización de los sensores como el alto grado de fiabilidad de los *RPAS. Al mismo tiempo, de una forma constante aparecen, a un ritmo potencial, nuevas aplicaciones relacionadas con los datos capturados con plataformas RPAS.

Se podrían dotar a los vehículos aéreos no tripulados (RPAS) de tipos multicóptero con una serie de sensores visuales HD, que combinados con sensores terrestres, permitan una mejor y productiva extracción de Datos y análisis de los elementos y superficies de los Túneles. Con este objetivo se persigue el aumento de productividad en determinados servicios, así como el valor añadido en la adquisición de datos y el uso actual de las plataformas. Un producto mucho más accesible a nivel de costes y disponibilidad operativa que las soluciones que hoy en día se pueden encontrar al mercado. En esta línea, en la presente propuesta se pretende avanzar hacia un RPAS que adquiera los Datos necesarios por posteriormente, ser tratadas con el fin de obtener un levantamiento completo con sistema BIM.

Los datos recogidos durante el vuelo se transfieren a una central de manera automática mediante una infraestructura “*cloud”. Una vez allí, estos datos se procesan con un software propio que elaborará una nube de puntos denso que será el inicio de la base para generar el

levantamiento con sistema BIM. El procesamiento de los datos se genera por el principio de la fotogrametría, el cual se define cómo:

La fotogrametría, según la ASPRS se define como “arte, ciencia y tecnología de obtener información fidedigna de los objetos físicos y del medio ambiente mediante procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y de modelos de energía radiante y electromagnética y otros fenómenos”.

El concepto de fotogrametría es: “medir sobre fotos”. Si trabajamos con una foto podemos obtener información de los objetos o del terreno, pero necesitamos al menos dos fotografías de cada de cada zona para obtener información tridimensional y crear un modelo estereoscópico de la zona para poder trabajar.”

De esta forma se pueden obtener modelos con un GSD inferior a 1 cm, obteniendo una calidad de Datos óptimo para el siguiente proceso.

El hecho de realizar la adquisición de datos con tecnología RPAS va a permitir:

- Mayor Accesibilidad operativa, siendo posible realizar trabajos fotogramétricos en terrenos de difícil acceso o con una accesibilidad limitada debido a su uso o incapacitado de paralizar su uso.
- Adquisición de Datos única, disponiendo de toda la información requerida para realizar posteriormente en despacho un levantamiento con sistema BIM sin la necesidad de volver a la Infraestructura para retomar datos no adquiridos.
- Aumento entre 3 a 5 veces la adquisición de datos por jornada. 2 km/jornada en adquisición de datos Terrestres y 6 km/jornada en adquisición de datos mediante tecnología RPAS
- Reducción de los plazos de entrega en más de un 30% debido a la mayor velocidad operativa y rapidez del procesamiento.
- Reducción mínima del 20% y hasta el 40% del coste km/€ respecto los métodos de adquisición de datos terrestres.
- Entregables de valor diferencial. Generación de entregables mediante levantamiento con sistema BIM. Realización de diferentes
- Entregables que proporcionan más información de la Infraestructura y por lo tanto, valor añadido al trabajo.

A partir de la presa de datos e información mediante RPAS se procederá a la generación del levantamiento de la infraestructura con sistema BIM. La base de presa de datos mediante tecnología RPAS nos va a permitir disponer de toda la información requerida para no ser necesario volver a la infraestructura a adquirir datos no tenidos en cuenta.

Algunos de los beneficios para trabajar con un sistema BIM son:

- **Diseño digital inteligente:** cada parte diseñada digitalmente une y relaciona sus datos (propiedades) de producto y características para realizar cálculos automáticos, detectar interferencias de manera automatizada, y producir cambios al conjunto desde partes, entre otras muchas ventajas que benefician al diseño, a la fabricación y la ejecución al mejorar su precisión y planificación.
- **Análisis y simulación avanzados:** cada propuesta de diseño puede ser rigurosamente analizada gracias a que las simulaciones se realizan de forma rápida, y el rendimiento siempre es el punto de referencia, lo cual permite seleccionar soluciones innovadoras, eficaces y eficientes.
- **Ciclo de vida incluido:** Los costes durante la vida útil, la explotación económica beneficiosa y la sostenibilidad ambiental son tres de los requisitos más demandados por administraciones públicas y clientes privados, y que gracias al BIM se pueden medir y calcular.
- **Mejora de procesos:** tener un protocolo de datos común permite en gobiernos, industria, y fabricantes a operar más eficazmente dado que es más fácil compartir información, analizarla en el tiempo, y reutilizarla.
- **Gestión documental inteligente:** en BIM solamente es necesario modelar los objetos una vez para toda la documentación del proyecto, dado que se derivan automáticamente a los planos, vistas, etc., que sean requeridos, con el beneficio añadido que se evitan interferencias y diferencias.
- **Mejor servicio al cliente:** la representación visual en 3D y 2D precisa y realista de las diferentes propuestas mejoran la explicación de los proyectos a los clientes y otros interesados.

- Gestión de Proyectos: Los datos del ciclo de vida (requisitos, el diseño, la construcción y la información operativa) se pueden utilizar en la gestión de los proyectos para su planificación, ejecución, mantenimiento y desmantelamiento.

En conclusión, se presenta una solución tecnológica con el fin de adquirir los datos con mayor productividad, reducción de tiempo de operación (paralización de la infraestructura y reducción de trabajos en campo) y en consecuencia una reducción de costes.

Quienes son necesarios y como sería el proceso de una inspección de obra civil (ingeniero y piloto con diferente topología de cámaras...)

4.3 CASO PRÁCTICO DE INSPECCIÓN

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Pliego de Prescripciones Técnicas para la Inspección Principal se realizó la inspección visual de dos túneles de carreteras.

En el túnel 1, simultáneamente a la inspección visual se realizó un escaneado mediante la técnica de laser-escáner en toda la superficie.

En el túnel 2, simultáneamente a la inspección visual, se utilizó la técnica del mobile mapping.

La inspección visual se ha efectuado mediante el empleo de un vehículo equipado con una cesta hidráulica, que circulando a baja velocidad permitía una correcta observación de toda la bóveda. En caso de visualizar cualquier tipo anomalía se detenía la marcha accediendo con la plataforma e inspeccionando el punto deseado

Todas las observaciones efectuadas, han sido referenciadas, mediante un odómetro, con las referencias de los DB marcados por los equipos de conservación en las aceras de los túneles.

En los anejos adjunto las fichas de campo de las inspecciones realizadas como también imágenes en modo resumen según la tecnología empleada en cada túnel.

5. CONCLUSIONES

- Las nuevas tecnologías nos permiten reducir la incertidumbre presente en las obras subterráneas, en todas sus fases, desde el planeamiento hasta su conservación, pasando por su construcción.
- Nos permiten obtener el estado en un momento determinado de la infraestructura, el cual podremos consultar desde nuestro pc y comprobar la evolución del mismo, comparándolo los resultados con inspecciones futuras.
- Constituye un perfecto complemento para el técnico que realiza la inspección visual convencional así como para el gestor de la infraestructura.
- En las tres tecnologías estudiadas, los resultados que se pueden obtener, son muy parejos.
- La toma de datos, conlleva unos condicionantes al gestor y molestias para el usuario de la infraestructura, por ser necesarios cortes de carril o totales de carretera, no siempre coincidentes con los que necesita la inspección visual convencional, que hay que tener en cuenta si se quieren evaluar los costos de la aplicación de estas tecnologías.
- Por lo experimentado en este trabajo, el escáner-láser conlleva más afecciones al usuario pero es menos costoso que el mobile-mapping, el cual no comporta afecciones al usuario.
- La tecnología DRON, es capaz de realizar la inspección de la infraestructura a una velocidad y tiempo parejo a lo que lo hace la tecnología mobile-mapping siendo mucho más competitivo en coste y capaz de acceder a lugares inaccesibles para el resto de tecnologías.
- Los nuevos procedimientos de ejecución de túneles, han conseguido optimizar no solo los rendimientos, sino la seguridad y el coste de las infraestructuras.
- El nuevo método austríaco, es capaz de aprovechar la capacidad de terreno a sostenerse él mismo disminuyendo el sostenimiento requerido.
- El mundo de la construcción, está apostando por la investigación para conseguir incorporar materiales naturales, reciclados, que hasta ahora solo tenían su aplicación en la industria.
- El uso de las nuevas tecnologías y materiales comporta que nuestras infraestructuras puedan llevarse a cabo minimizando el impacto ambiental que en el pasado.

BIBLIOGRAFIA

López Gimeno, Carlos, "Ingeniería del Terreno "Libro 1, U.D. de Proyectos de la E.T.S.I. de Minas de la U.P.M. (2002)

López Gimeno, Carlos , "Manual de túneles y obras subterráneas", U.D. de Proyectos de la E.T.S.I. de Minas de la U.P.M. (2000)

López Gimeno, Carlos "Manual de perforación de túneles) 2014

Gili Ripoll, José A. "Descàrrega i processat de dades Làser Escàner" i "Introducció a altres sensors geomàtics per Observació de la Terra" Topografia y geotècnia, apuntes de la asignatura de la E.T.C de Ingenieros de Caminos de la U.P.C (2013)

Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports "Túnel i mecànica de roques"

G. Voselman & H-G Maas "Airborne and Terrestrial Laser Scanning" CRC Press, (2010)

Jesús Gómez Hermoso, "Grandes obras de ingeniería. Su proyecto y construcción" (2016)
Fomento, normativa. "Requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado" (RD 635/2006)

Fomento, normativa. "Metodología de inspección de túneles" (OC 27/2008)

Colegio de Caminos, Canales y Puertos, Revistas obras públicas 2013,2014, 2015 y 2016

Leica Pegasus: "One Sistema de Mapeamiento Móvil" (2016)

TopCon 3D Scanner >" Mobile Mapping System IP-S2 Lite"(2016)

Fernández, Gabriel i A.Bauer Robert. "Geo-engineeering for underground facilities"
Geotechnical special publication No.90 (1999)

Información proporcionada en la Expodróica en Zaragoza el pasado 22 y 23 de Setiembre del 2016

ANEJOS

ANEJO 1 INSPECCIÓN EN TÚNEL 1

Inspección visual convencional

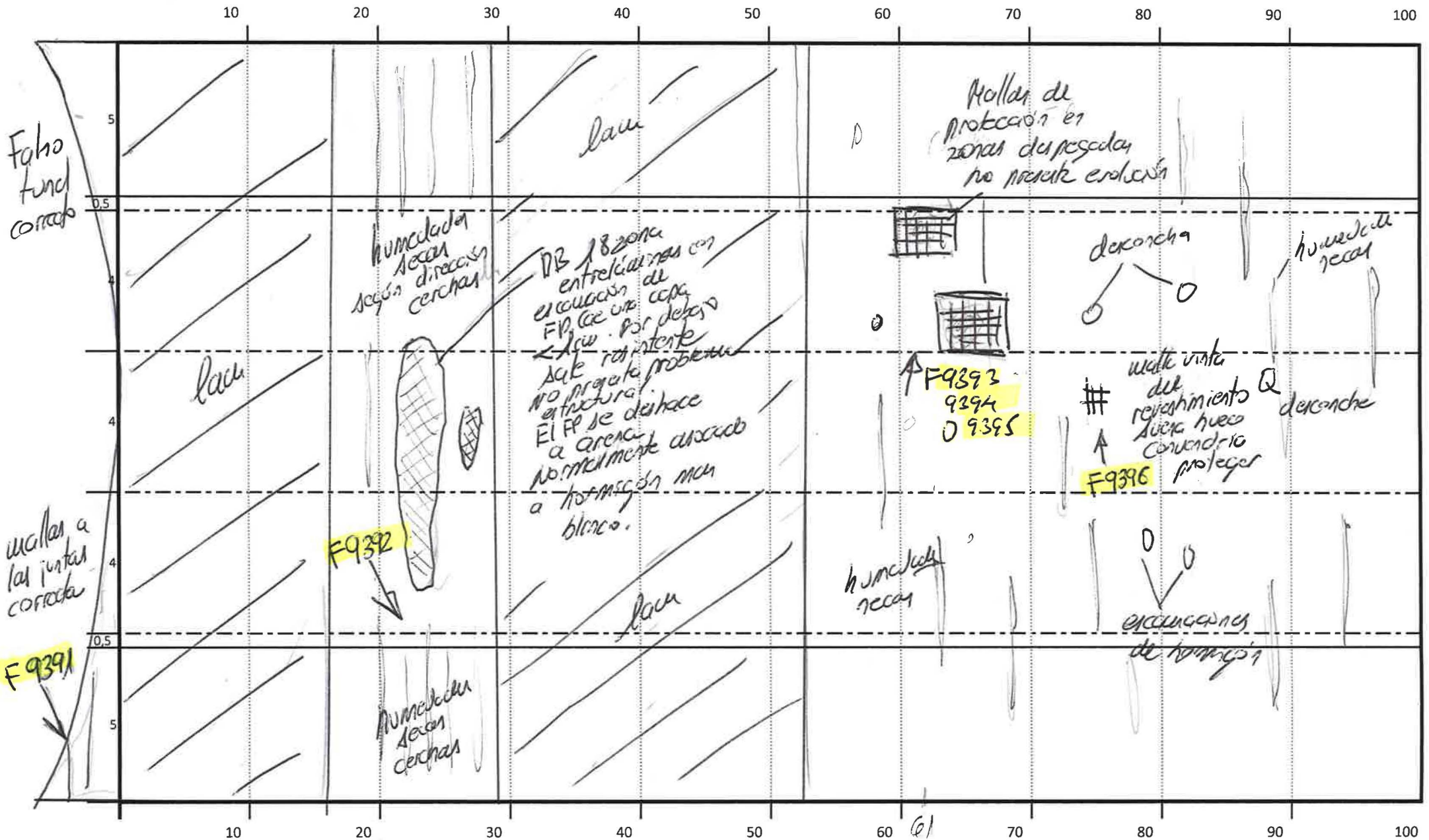
En el túnel 1 se realizó una inspección visual con percusión de bóveda, en la que se detectaron varias zonas despegadas que sonaban a hueco en el momento de percutir. Estas zonas se protegieron mediante unos parches de malla anclados con bulones cortos, de los que existen un total de 7 actuaciones. Se han comprobado dichas zonas, constatando que se encuentran en un estado correcto sin observar roturas ni materiales retenidos.

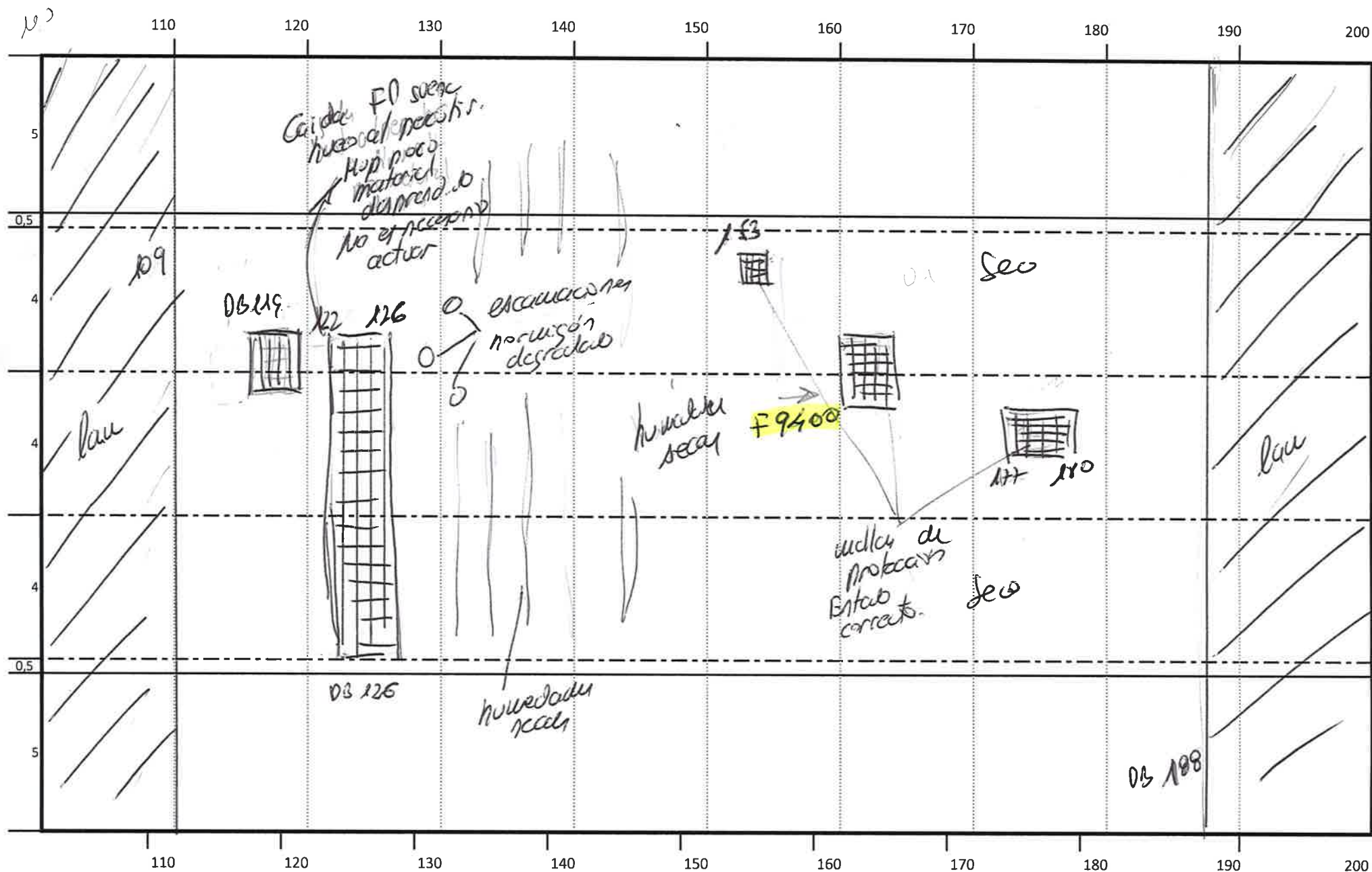
Entre el DB (distancia a boca del túnel según el tráfico) 60 y 80 se detecta una mayor concentración de patologías de diferente índole, de las que destacan: humedades, puntos con degradación de hormigón proyectado, actuaciones con malla de protección y varios puntos donde aflora la malla de revestimiento.

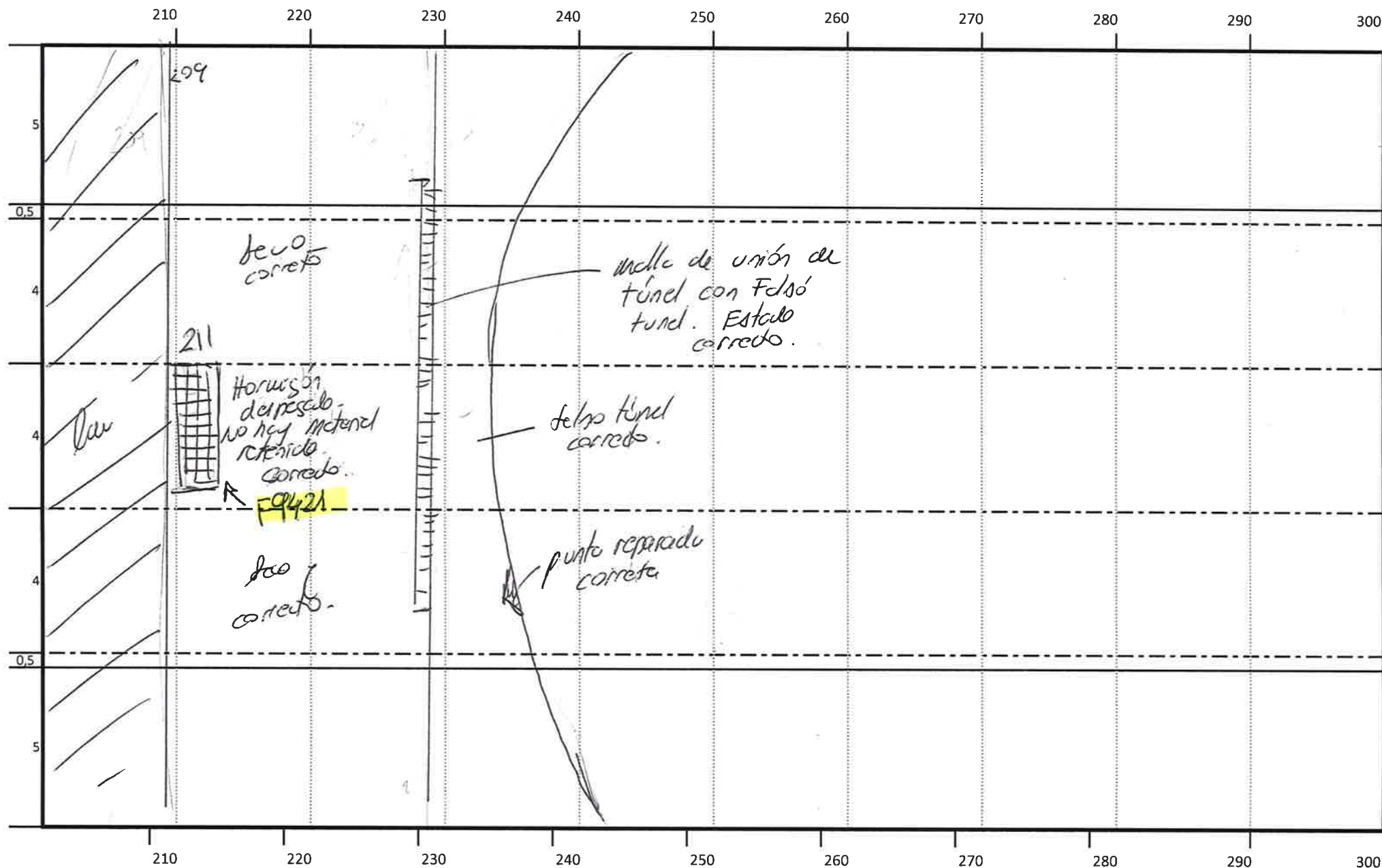
Las observaciones más importantes efectuadas en la presente inspección son las siguientes:

En el DB 18, en la zona de clave, se localiza una zona con el hormigón degradado, produciendo la escamación y caída de una capa de un grueso aproximado de 1 cm. Normalmente estas escamaciones van acompañadas de un cambio en la tonalidad del hormigón proyectado, el cual presenta un color blanquecino. Esta capa se desprende fácilmente con el martillo e incluso con las manos, deshaciéndose a arenilla. ☐ En el DB 75 se ha detectado una pequeña zona con malla vista, que suena a hueco en el momento de percutir con el martillo. No presenta riesgo de desprendimiento. ☐ En los DB 60 y 80 en el carril derecho y en el DB 130 de clave al carril derecho se detecta una degradación superficial del hormigón con varios desconches de pequeña envergadura.

Fichas de campo

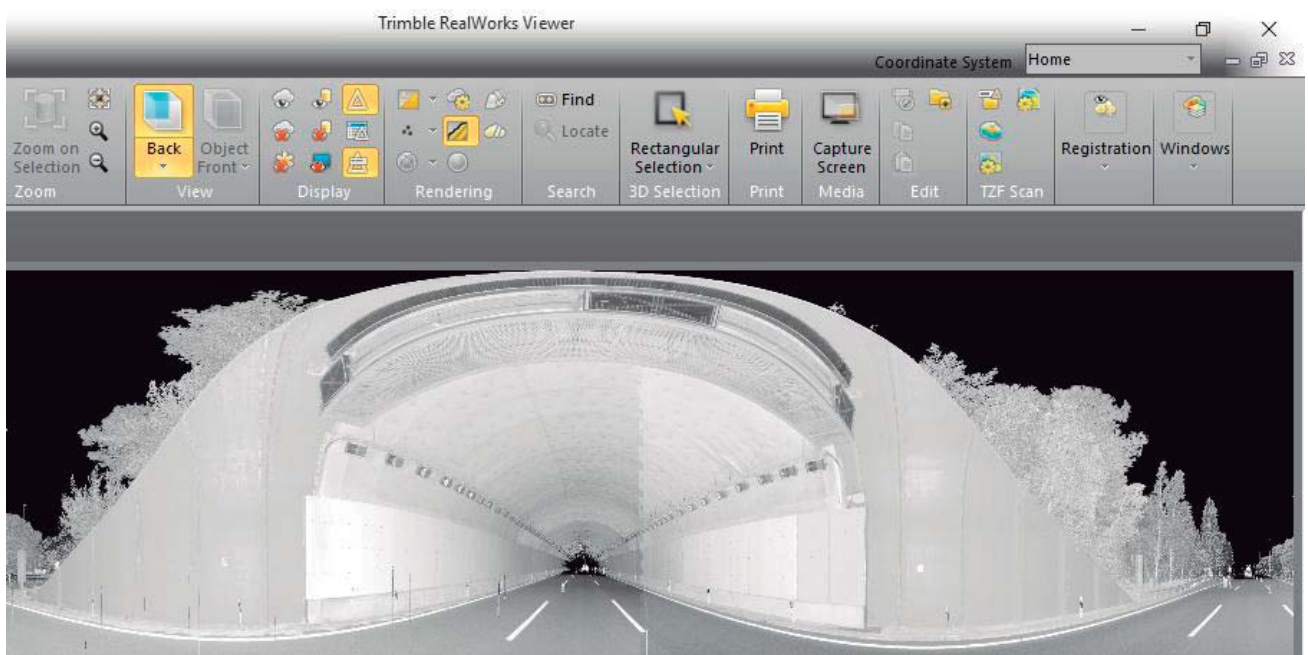






Ilustraciones láser-escáner

Los datos obtenidos con la tecnología escáner-láser, se han visualizado con el aplicativo RealWorks Viever de la casa Trimble, version 10.1. Se adjuntan imágenes capturadas del programa.



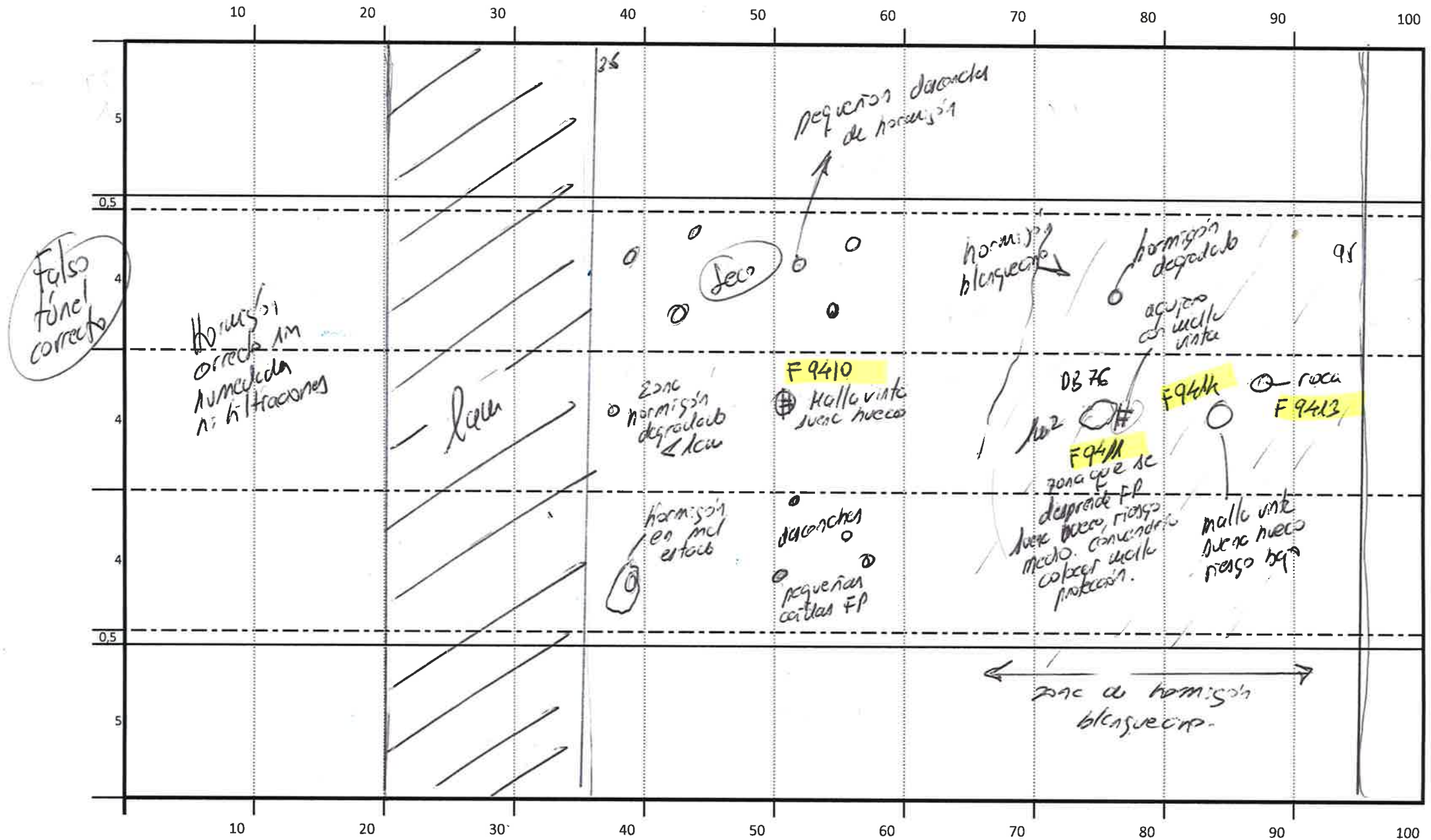
ANEJO 2 INSPECCIÓN EN TÚNEL 2

Inspección convencional

En el túnel 2 se realizó una inspección visual convencional y se vió que el estado del revestimiento de este túnel es muy variable lo que permite una tramificación bastante definida en función de la ausencia o no de patologías. Así pues se puede tramificar de la siguiente manera:

- DB 0 a 35. Corresponde al tramo de la Boca Sur y comprende los 20 primeros metros de hormigón visto y un tramo de lámina de 15 m. El tramo hormigonado se encuentra en buenas condiciones y se ignora el estado del tramo impermeabilizado, aunque es 10 posible que la lámina efectúe un efecto de protección evitando la degradación observada en otros tramos.
- DB 35 a 95. Este tramo presenta una patología en forma de una degradación superficial del hormigón proyectado. Esta degradación afecta a una capa inferior a 1.5 cm y produce múltiples desconches de pequeña magnitud. También se han detectado pequeñas zonas con la capa de revestimiento mal adherida, que suena a hueco en el momento de percutir con el martillo. A pesar de ello no se han detectado zonas con riesgo de producir desprendimientos. Se observan también varios puntos con malla vista y algún punto de pequeña dimensión en el que aflora la roca.
- DB 95 a 245 corresponde al tramo reparado, en el que tan sólo se observan algunas humedades puntuales.
- DB 245 a 280. Tramo donde se repiten la misma degradación superficial del hormigón con la formación de múltiples desconches de 1 cm de espesor.
- Db 245 a 300 Este tramo presenta un mejor aspecto, aunque el hormigón proyectado pierde el color grisáceo y toma un color blanquecino, signo de un principio de degradación. De momento no se observan desconches ni anomalías.
- DB 300 al 333 Tramo impermeabilizado

Fichas de campo

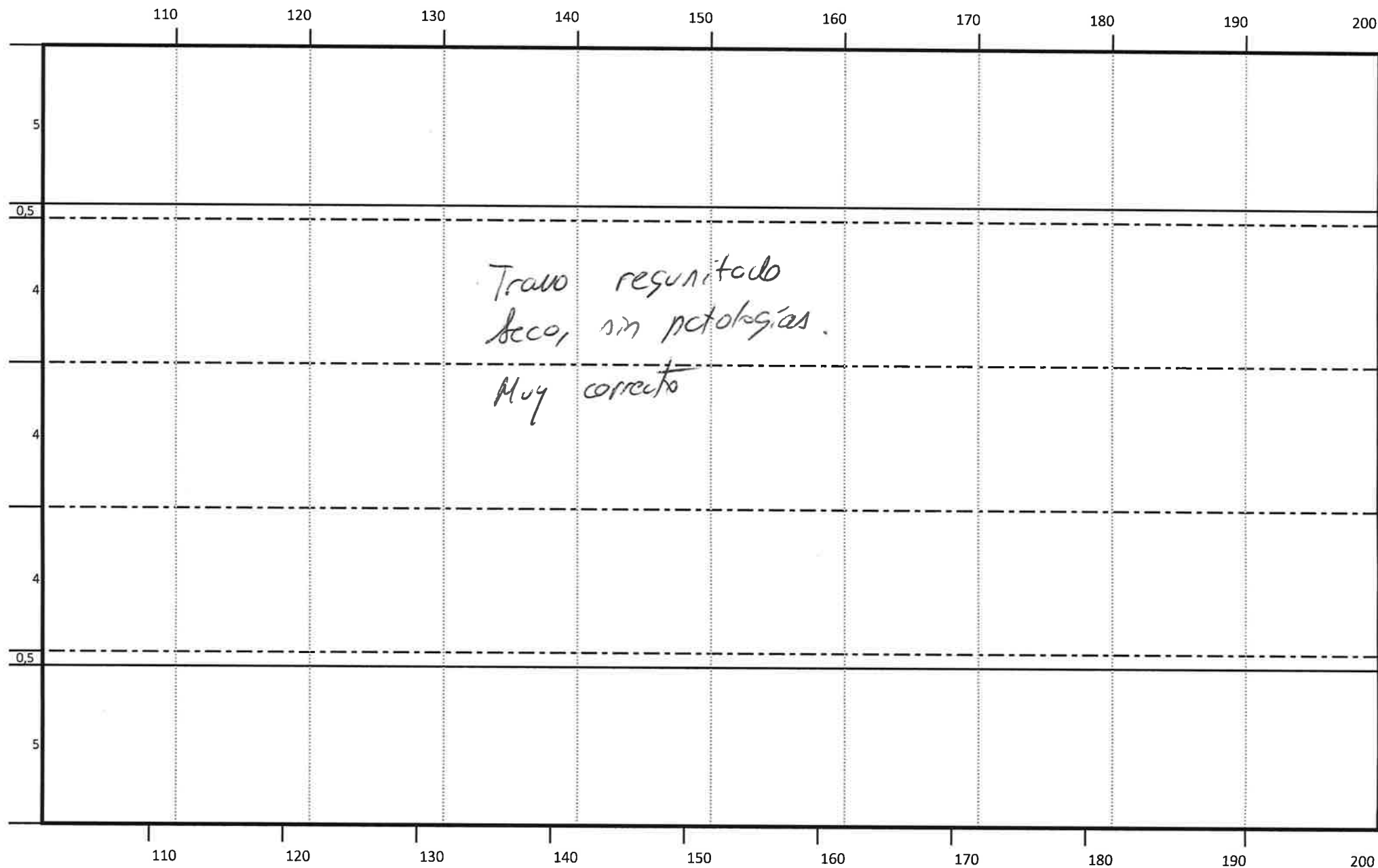


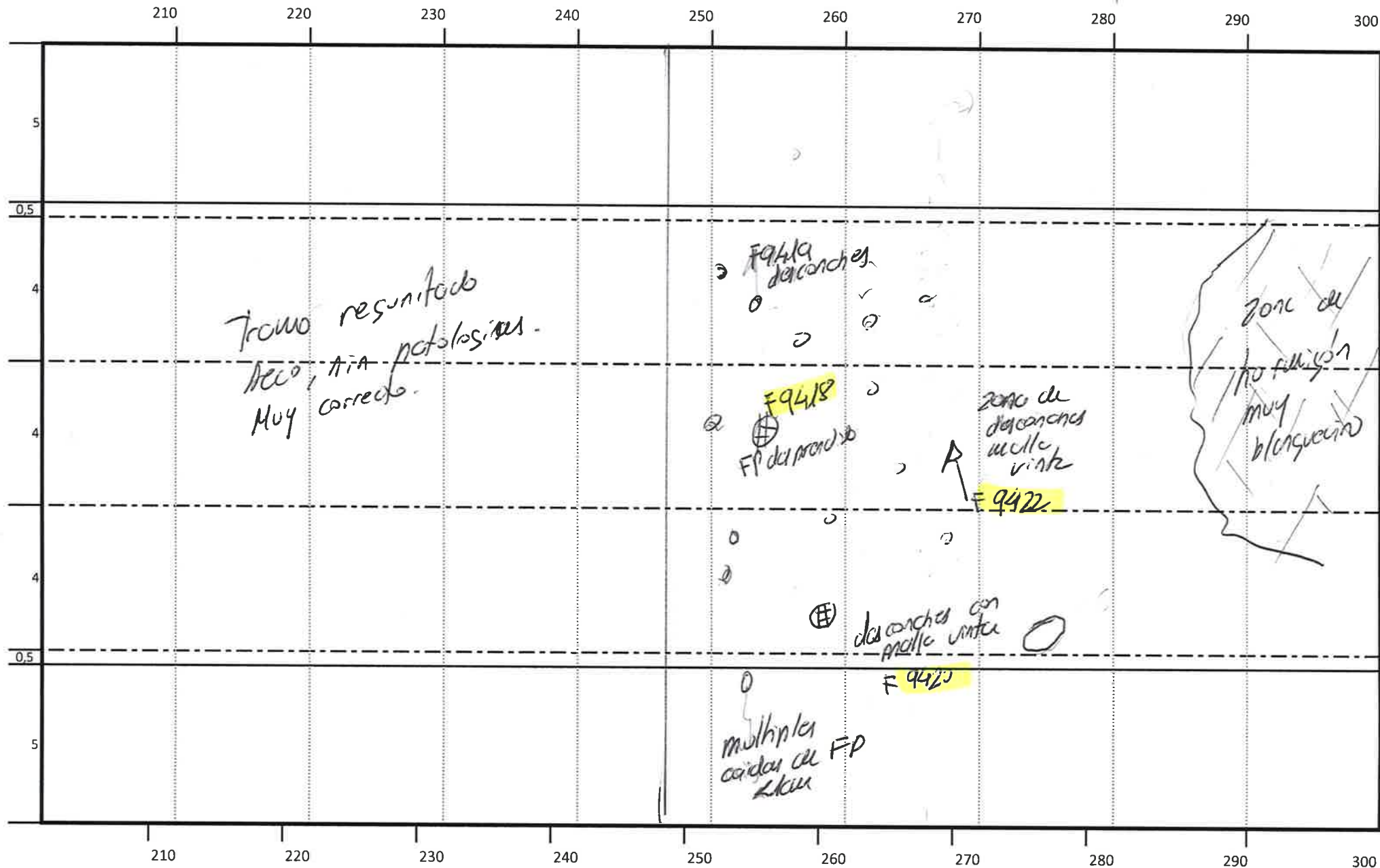
Fecha: _____

Túnel: _____

Carril: _____

Dirección: _____



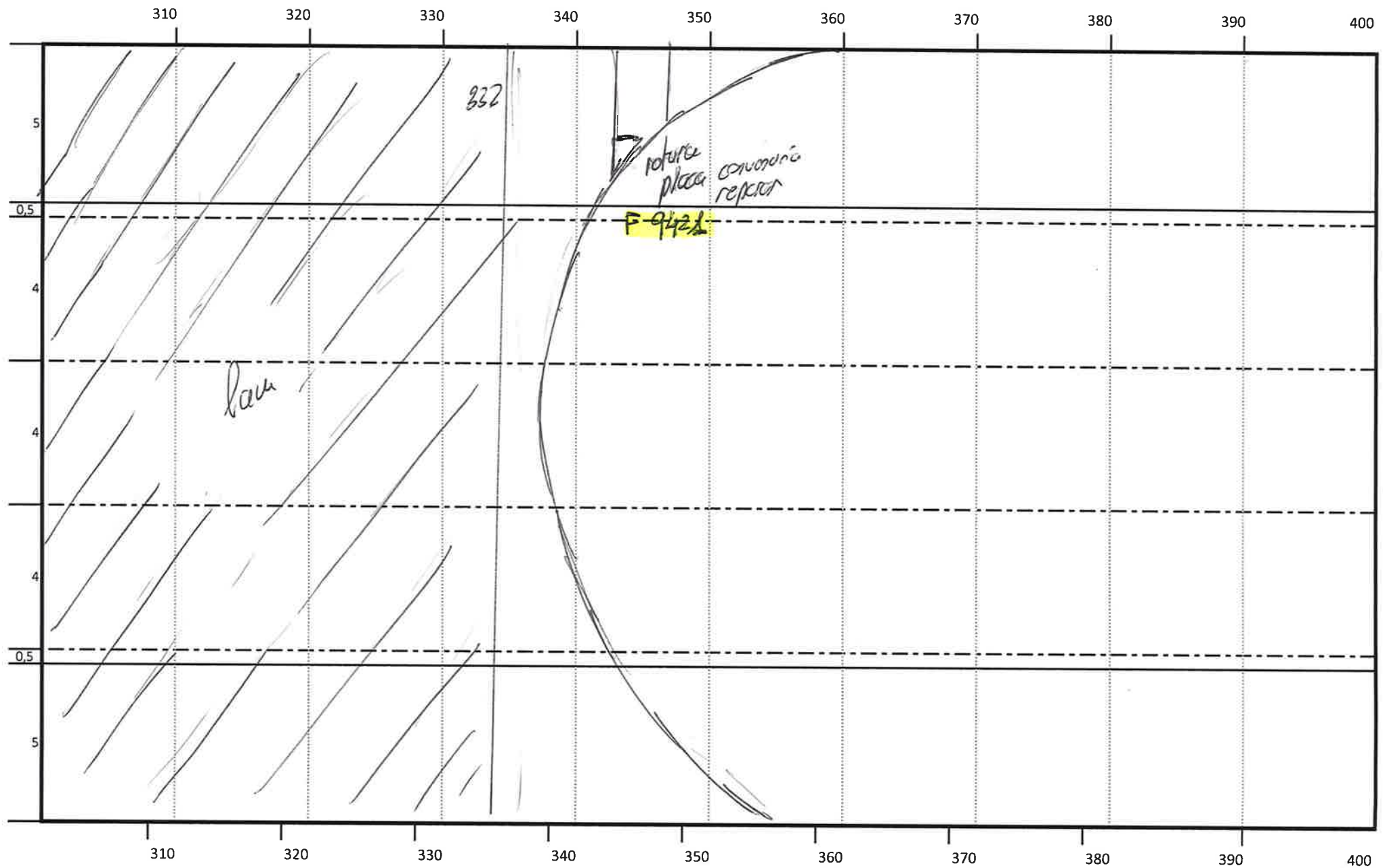


Fecha: _____

Túnel: _____

Carril: _____

Dirección: _____



Ilustraciones mobile-mapping

Los datos obtenidos con la tecnología mobile-mapping se han visualizado con el aplicativo Mobile Master office de la casa Topcon. Se adjuntan imágenes capturadas del programa.

